

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vaidas RAMŪNAS

MINERALINĖS SKALDOS PANAUDOJIMO GELEŽINKELIO BALASTUI GALIMYBIŲ VERTINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2016

Disertacija rengta 2011–2016 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T)

Nariai:

prof. habil. dr. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

dr. Viktors HARITONOVS (Rygos technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

doc. dr. Virgaudas PUODŽIUKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. gruodžio 9 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva. Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2016 m. lapkričio 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2390-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-969-1

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2016

© Vaidas Ramūnas, 2016

vaidas.ramunas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vaidas RAMŪNAS

FEASIBILITY EVALUATION OF USING THE CRUSHED MINERAL STONE FOR THE RAILWAY BALLAST

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2016

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2016.

Supervisor

Prof. Dr Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof. Dr Habil. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Dr Viktors HARITONOVŠ (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T),

Assoc. Prof. Dr Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Assoc. Prof. Dr Virgaudas PUODŽIUKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 9 December 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was sent on 8 November 2016.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Mineralinės skaldos kokybė yra vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių balasto prizmės savybes ir visos geležinkelio kelio viršutinės konstrukcijos patvarumą eksploatacijos metu. Geležinkelio kelio balasto ilgalaikiškumas ir eksploatacijos kaštai labiausiai priklauso nuo jį sudarančios mineralinės skaldos mechaninių savybių, kurios tampa svarbiausios, siekiant parinkti tinkamiausią skaldą balasto prizmei įrengti, atsižvelgiant į numatomus eismo apkrovų intensyvumus.

Darbo tikslas – pateikti moksliskai pagrįstą balasto skaldos parinkimo metodiką, kurioje įvertintos medžiagos fizinės ir mechaninės savybės bei perspektyvinės traukinių eismo apkrovos.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalboje ir 6 priedai.

Įvadiniam skyriuje aprašoma tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimų objektas, darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmame skyriuje atlikta literatūros analizė. Analizuojamos ir apibendrinamos geležinkelio kelio balasto funkcijos ir jam keliami reikalavimai. Nagrinėjami moksliniai tyrimai apie balasto degradacijos priežastis ir pasekmes, šiuo metu taikomą balasto skaldos parinkimo pasaulinę praktiką. Vertinama balasto būklė Lietuvos geležinkelių linijose.

Antrajame skyriuje sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika, įvertinanti medžiagos fizines ir mechanines savybes. Sudaryta moksliniais tyrimais pagrįsta balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika. Tyrinėjamos Lietuvos rinkai tiekiamos skaldos, naudojamos geležinkelio balastui įrengti, fizinės ir mechaninės savybės. Pateikta standartizuotų eksperimentinių tyrimų programa, etapai, objektas, skaldos fizinių ir mechaninių savybių tyrimų rezultatai.

Trečiajame skyriuje vertinamos balasto fizinės ir mechaninės savybės jų skaitinės vertės lyginant su norminiuose dokumentuose pateikiamais reikalavimais. Atliktas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimų vertinimas, suklasifikuoti Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliai. Pateiktas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodikos praktinis realizavimas. Atlikta balasto mechaninių savybių rodiklių klasifikavimo taikymo kaštų ir naudos analizė.

Disertacijos tema yra paskelbti 7 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę ir turinčiame citavimo rodiklį (IF), trys – duomenų bazės „ISI Proceedings“ leidiniuose, trys – mokslo žurnaluose, referuojamuose kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose.

Abstract

The quality of crushed stone is one of the most important factors, which determine the properties of ballast prism and durability of the entire superstructure of railway. Lifespan and costs of maintenance of the railway ballast are mostly dependent on mechanical properties of crushed stone. These properties become most important when aiming to select the most appropriate crushed stone for ballast prism, taking the intensity of expected traffic loads into account.

The aim of the dissertation is to provide a scientifically based crushed stone ballast selection methodology, where the physical and mechanical properties of the material, as well as the potential train traffic loads are evaluated.

Dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, the list of references, the list of author's publications on the topic of the dissertation, summary in English and 6 annexes. Introduction describes the studied problem, topicality of the work and the object of research, the formulated aim and tasks, research methodology, scientific novelty, practical value of results, the defended propositions and the scope of the scientific work.

Chapter 1 contains a review of research works, describes functions and requirements of the railway line ballast. The chapter gives the analysis of causes and effects of ballast degradation, as well as currently used worldwide practices for crushed stone ballast selection. Condition of ballast on Lithuanian railway lines is evaluated.

Chapter 2 describes the creation of the methodology for selecting crushed stone ballast, which takes into account the physical and mechanical properties of the material. It also describes the creation of scientifically based methodology for calculating the lifespan of ballast. Physical and mechanical properties of crushed stone is examined. A program of standardized experimental research, its stages, object and results are provided.

Chapter 3 provides the evaluation of ballast properties when comparing their numeric values with the requirements found in standardized documents. Evaluation of ballast lifespan calculation method is performed and the classification for Los Angeles indicator and micro-Deval indicator is composed. Practical realization of ballast lifespan calculation methodology is provided. Analysis of costs and benefits of classification of indicators of the mechanical properties is performed.

Seven scientific articles were published on the topic of the dissertation: one – in scientific journal included in the *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)*, three – in *ISI Proceedings*, three – in scientific journals, refereed in other international databases. On the topic of the dissertation, three presentations were made in three scientific conferences.

Sąvokos

Balastas (angl. *ballast*) – ant sankasos pilamos birios, rupios mineralinės medžiagos sluoksnis.

Balasto sluoksnis (prizmė) (angl. *ballast prism*) – nustatytos formos ir dydžio balasto sankasa pabėgiams atremti, užtikrinanti reikiamą geležinkelio kelio stiprumą, normalų naudojimą ir ilgalaikiškumą.

Balasto plūkimas (angl. *ballast stabilization, tamping*) – mechaninis balasto prizmės tuštumų mažinimas ir sluoksnio tankinimas plūkiant ar vibruojant specialiomis mašinomis.

Balasto užterštumas (angl. *ballast contamination, ballast pollution*) – rodiklis, matuojamas teršalų kiekiu (procentais) nuo bendros balasto prizmės masės arba teršalų tūrio ir tuštumų tūrio santykiu.

Bandinys (angl. *test portion*) – ėminio dalis, kuri sunaudojama vienam bandiniui.

Bėgių sandūra (angl. *rail joint*) – bėgių galų sujungimo vieta.

Bruto (angl. *gross*) – svoris su pakuote.

Daugiakelis geležinkelis (angl. *multipath railway*) – geležinkelis, kurį tarpstočiuose sudaro daugiau kaip du pagrindiniai keliai.

Degradacija (angl. *degradation*) – savybių laipsniškas mažėjimas, blogėjimas.

Dolomitas (angl. *dolomite*) – nuosėdinės, rečiau hidroterminės kilmės karbonatinė uoliena, sudaryta iš dolomito mineralo kristalų su nedidele (iki 25 %) kitų mineralų – kalcito, rečiau gipso, molio mineralų ir geležies oksidų – priemaiša.

Dūlėjimas (angl. *weathering*) – geologinis procesas, kurio metu yra uolienos, gruntai ar mineralai veikiami fizinių, cheminių ar biologinių veiksnių.

Dvikelis (angl. *double-track railway*) – geležinkelis su dviem pagrindiniais keliais tarpstočiuose.

Efektyvumas (angl. *efficiency*) – Išteklių panaudojimo veiksmingumas, kai norimas rezultatas pasiekiamas mažiausiomis įmanomomis sąnaudomis arba naudojant turimus išteklius pasiekiamas maksimalus įmanomas rezultatas.

Ėminys (angl. *sample*) – iš generalinės aibės (tiriamosios visumos) tyrimui paimtas objektas ar medžiagos porcija.

Feldšpatai arba **Lauko špatas** (angl. *feldspar*) – silikatų klasės, uolienas formuojančių mineralų grupė, kuri sudaro apie 60 % žemės plutos.

Frakcijos dalelių stambumas (angl. *particle size fraction*) – užpildo dalis, išbyranti per retesnįjį iš dviejų pasirinktų sietų ir liekanti ant tankesniojo sieto.

Geležinkelio balastas (angl. *railway ballast*) – tiesiamam geležinkeliui naudojama mineralinė medžiaga, kurios dalelių 100 % paviršiaus gali būti apibūdintas kaip visiškai skeltas.

Geležinkelio balasto skaldos stambumas (angl. *size of the railway ballast crushed stone*) – geležinkelio balasto dalelių dydis, apribotas apatinio (d) ir viršutinio (D) sietų akų dydžiu. Tokiame apibrėžime pripažįstama, kad jame gali būti tam tikro kiekio dalelių, kurios užsilaikys ant viršutinio sieto (per stambi frakcija) ir tam tikro kiekio dalelių, kurios praeis pro apatinį sietą (per smulki frakcija).

Geležinkelio kelio viršutinė konstrukcija (angl. *railway superstructure*) – virš sankasos esanti konstrukcijos dalis, kurios paskirtis yra išlaikyti riedmenis ir paskirstyti apatinės konstrukcijos veikiančias apkrovas. Viršutinę kelio konstrukciją sudaro: bėgiai, pabėgiai, balastas, sąvaržos, priešštūmiai, iešmai, tiltiniai ir iešmo pabėgiai.

Geotekstilė (angl. *geotextile*) – pralaidus vandeniui audinys, pagamintas iš polipropileno arba poliesterio. Naudojama grunte norint atskirti ir stiprinti jo sluoksnius, filtruoti, apsaugoti ar nusausinti (drenuoti).

Granitas (angl. *granite*) – magminių intrūzinių uolienų grupė. Susidaro kontinentuose veikiant dideliame slėgiui ir temperatūrai.

Granitoidai (angl. *granitoid*) – rūgščiosios intruzinės uolienos – granitas, granodioritas, plagiogranitas ir visos jų atmainos.

Ilgalaikiškumas (angl. *lifespan, durability*) – medžiagos ir/ar konstrukcijos savybė išlikti nepakitusia ilgą laiką.

Imtis (angl. *sample*) – iš generalinės aibės tyrimui ėminių grupė.

Išdžiovinutų dalelių tankis (angl. *particle density on an oven dried basis*) – krosnyje išdžiovinuto užpildo ėminio dalelių masės ir tūrio, kurį jos užima vandenyje, įskaitant jose esančias uždaras ir atviras poras, dalmuo.

Išjudintas balastas (angl. *moved ballast*) – terminas apibūdinantis balastą, kuriame dėl kelio ištaisymo darbų technologinių procesų išnyksta įtempiai.

Įmirkis (angl. *water absorption*) – išdžiovinto krosnyje užpildo masės padidėjimas nuo vandens įgėrio į atviras poras.

Kalkakmenis (angl. *limestone*) – nuosėdinė karbonatinė uoliena.

Kapitalinis remontas (angl. *major repair*) – geležinkelio kelio remontas, kuris atliekamas po 25 metų nuo kelio pastatymo arba jei pervežta daugiau nei 500 mln. t bruto krovininių. Šio remonto metu keičiama visa kelio konstrukcija ir daromas sankasos remontas.

Kelio ištaisymas (angl. *track rectification*) – viršutinės kelio konstrukcijos geometrijos atstatymas į projektinę padėtį.

Kelio mašina (angl. *track machine*) – mašina viršutinei tiesiamo ir rekonstruojamo kelio konstrukcijai įrengti ar kitiems kelio taisymo ir priežiūros darbams atlikti.

Kietumas (angl. *hardness*) – kietos medžiagos savybė priešintis kito, už jį kietesnio, kūno įsmigimui, įspaudimui. Nuo šios savybės priklauso medžiagų tinkamumas apdirbti pjovimu.

Klasė (angl. *category*) – mineralinės medžiagos savybės lygis, išreikštas verčių intervalu arba ribine verte.

Klintys – (angl. *limestone*) – nuosėdinė karbonatinė uoliena.

Kvarcas (angl. *quartz*) – labiausiai Žemės plutoje paplitęs mineralas, silicio dioksidas SiO_2 ; svarbiausias magminių ir metamorfinių uolienų komponentas.

Metinis eismo apkrovų intensyvumas (MEAI) (angl. *annual traffic load intensity*) – traukinių eismo apkrovų kiekis per metus, vertinantis traukinių bruto masę.

Mineralinė medžiaga (angl. *aggregate*) – grūdelių pavidalo medžiaga, naudojama statyboje. Mineralinė medžiaga gali būti gamtinė (natūrali), dirbtinė arba antrinio perdirbimo

Mineralinės dulkės (angl. *fines*) – balasto dalelės, praeinančios pro 0,063 mm akučių dydžio sieta.

Mikroužpildai (angl. *microparticles*) – tai į mišinius dedamos smulkiadispersinės medžiagos, kurių dalelių smulkumas artimas rišiklio dalelių smulkumui.

Nusėdimas (angl. *settlement*) – balasto ir kartu visos viršutinės konstrukcijos nusileidimas vertikalėje, kurį lemia dėl apkrovų tankėjantis ir degraduojantis balastas.

Optimalus (angl. *optimal*) – tinkamiausias, geriausias.

Pabėgiai (angl. *sleeper*) – skersiniai kelio komponentai, kurie nustato vėžės plotį ir perduodantys apkrovas nuo bėgio balastui arba kitai pabėgio atramai.

Pamušimas – tai kelio pakėlimas ir skersinis pastūmimas (richtavimas) į reikiamą padėtį, tuo metu perstumiant balastą viršutinėje jo dalyje tam, kad neliktų tuštumų po pabėgiais ar tarp jų.

Petrografija (angl. *petrography*) – mokslas tiriantis uolienų mineralinę ir cheminę sudėtį, struktūrą, tekstūrą, susidarymą, kitimą ir paplitimą.

Pobalastinis sluoksnis (angl. *sub-ballast*) – apatinis balasto prizmės sluoksnis, neleidžiantis sankasos gruntams patekti ir užteršti aukščiau esantį skaldos sluoksnį.

Protarpis (angl. *rail space*) – tarpas, paliekamas tarp sujungiamų bėgių galų.

Sąvarža (angl. *fastening*) – bėgio tvirtinimo prie bėgių pagrindo (pabėgių) arba jungimo su kitu bėgiu įtaisas.

Smulkiosios dalelės (angl. *fine particles*) – geležinkelio balasto dalelės, praeinančios pro 0,5 mm akučių dydžio sieta.

Šlakas (angl. *slag*) – metalurgijos procesų produktas – skystis, kuris susirenka ant išlydyto metalo paviršiaus; kietėdamas virsta į stiklą arba akmenį panašia medžiaga.

Tuštymėtumas (angl. *voids*) – rodiklis, parodantis kurią tūrio dalį piltinėje medžiagoje užima tuštymės. priklauso nuo dalelių formos, granulimetrinės sudėties, drėgnumo, sutankinimo laipsnio ir kt.

Žymėjimai

Simboliai

A_k – įvesties parametro korekcijos koeficientas matavimo vienetams;

B_k – įvesties parametro korekcijos koeficientas ašies apkrovai;

C_k^{-1} – įvesties parametro korekcijos koeficientas pabėgių tipui;

e_b – teršiančios medžiagos tuštymėtumo koeficientas;

e_f – švaraus balasto tuštymėtumo koeficientas;

f – mineralinių dulkių kiekio rodiklis, %;

F – atsparumo šaldymui ir šildymui rodiklis, %;

Fl – plokštumo rodiklis, %;

G_F – smulkiųjų dalelių kiekio rodiklis, %;

G_{sb} – švaraus balasto lyginamasis svoris, kg;

G_{sf} – teršiančios medžiagos lyginamasis svoris, kg;

L – dalelių ilgio rodiklis, %;

LA – atsparumo trupinimui rodiklis (Los Andželo koeficientas), %;

L_{GB} – balasto ilgalaikiškumas, kai pabėgiai gelžbetoniniai, MGT;

L_{ife} – balasto ilgalaikiškumas, MGT;

L_M – balasto ilgalaikiškumas, kai pabėgiai mediniai, MGT;

MA – dalelių atsparumo tarpusavio trinčiai rodiklis (*ang. Mill Abrasion Value*), %;

M_b – sausa švaraus balasto masė, kg;

M_{DE} – atsparumo dėvėjimuisi rodiklis (mikro-Devalio koeficientas), %;

M_f – sausa teršiančios medžiagos masė, kg;

N_A – kompleksinis dėvėjimosi rodiklis, %;

SI – formos rodiklis, %;

SZ_{RB} – atsparumo smūgiams rodiklis, %;

W_{cm} – stambiojo užpildo dalelių įmirkis, %;

V_f – teršiančių medžiagų tikrasis tūris balasto tuštumose, m³;

V_{sb} – pradinis tuštymų tūris švariame balaste, m³;

V_{vb} – švaraus balasto tuštumų tūris, m³;

V_{vf} – tūris medžiagos, užteršiančios balastą, m³;

ρ_{cm} – stambiojo užpildo įmirkytų vandenyje dalelių tankis, kg/m³.

Santrumpos

BISM – balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika (*angl. BLCM – ballast lifespan calculation methodology*);

BSPM – balasto skaldos parinkimo metodika (*angl. BCSSM – ballast crushed stone selection methodology*);

GCI – gyvavimo ciklo išlaidos;

KRVPG – Kanados Ramiojo vandenyno pakrantės geležinkeliai (*ang. CPR – Canadian Pacific Railway*);

MEAI – metinis eismo apkrovų intensyvumas, MGT;

PTU – procentinis tuštymų užterštumas;

TUI – tuštymų užterštumo indeksas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	6
Padėka	6
1. GELEŽINKELIO BALASTO SAVYBIŲ VERTINIMO PASAULINĖ PRAKTIKA ..	7
1.1. Balasto funkcijos ir jam keliami reikalavimai	7
1.1.1. Balasto prizmė ir jai keliami reikalavimai	7
1.1.2. Reikalavimai balasto skaldai	11
1.2. Balasto degradacijos priežastys ir pasekmės	12
1.2.1. Kelio priežiūros technologinių operacijų įtaka balasto degradacijai	12
1.2.2. Balasto taršos šaltiniai	15
1.2.3. Balasto savybių įtakos geležinkelio kelio degradacijai tyrimai	21
1.3. Balasto savybių vertinimo ir leistinųjų verčių normavimo pasaulinė praktika	24

1.4. Balastas Lietuvos geležinkelių linijose.....	33
1.4.1. Balasto būklė	33
1.4.2. Balastui tinkamų mineralinių medžiagų ištekliai	37
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	38
2. BALASTO SKALDOS PARINKIMO METODIKOS SUDARYMAS IR SKALDOS SAVYBIŲ TYRIMO REZULTATAI.....	39
2.1. Balasto skaldos parinkimo metodika	39
2.2. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika	42
2.2.1. Atsparumas trypinimui ir nusidėvėjimui dėl dalelių trinties	42
2.2.2. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika pagal Canadian Pacific Railroads.....	46
2.2.3. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodikos pertvarkymas	47
2.3. Eksperimentinių bandymų programa ir metodika	49
2.4. Balasto skaldos eksperimentinių bandymų rezultatai	51
2.5. Antrojo skyriaus išvados	55
3. BALASTO FIZINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ BEI ILGALAIKIŠKUMO SKAIČIAVIMŲ REZULTATŲ VERTINIMAS	57
3.1. Balasto faktinių savybių ir norminių reikalavimų lyginamoji analizė	57
3.2. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo rezultatų vertinimas ir mechaninių savybių klasifikavimas	71
3.3. Balasto mechaninių savybių rodiklių klasifikavimo ekonominės naudos analizė	78
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	81
BENDROSIOS IŠVADOS	83
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	85
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	93
SUMMARY IN ENGLISH.....	95
PRIEDAI ¹	111
A priedas. Lietuvos geležinkeliuose naudojamos skaldos kasybos karjerai.....	113
B priedas. Eksperimentinių bandymų metodika ir įranga.....	117
C priedas. Skaldos granulometrinės analizės bendrieji ir grafiniai rezultatai.....	136
D priedas. Lietuvos geležinkelių linijos ir jų eismo apkrovos.....	144
E priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	146
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	156

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
Research object.....	3
Aim of the thesis.....	3
Objectives of the thesis.....	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings	4
Defended statements.....	5
Approval of the research findings	5
Approval of the research findings	6
Acknowledgements	6
1. WORLDWIDE PRACTICE OF RAILWAY BALLAST PROPERTIES EVALUATION	7
1.1. The functions and requirements of ballast.....	7
1.1.1. Requirements for the ballast prism	7
1.1.2. Requirements for the ballast crushed stone.....	11
1.2. The causes and effects of ballast degradation.....	12
1.2.1. Influence of technological railway maintenance operations on degradation of ballast	12

1.2.2. Sources of ballast pollution.....	15
1.2.3. Researches on the effects of ballast properties for railroad degradation.....	21
1.3. Worldwide practice for ballast property evaluation and standardisation of permissible values	24
1.4. Analysis of the ballast in Lithuania's railway lines.....	33
1.4.1. Condition of the ballast.....	33
1.4.2. Recourses of minerals appropriate for ballast.....	37
1.5. Conclusions of chapter 1 and formulation of tasks of the thesis	38
2. FORMATION OF BALLAST CRUSHED STONE SELECTION METHODOLOGY AND THE RESULTS OF CRUSHED STONE PROPERTIES TESTING	39
2.1. Crushed stone ballast selection methodology.....	39
2.2. Ballast lifespan calculation methodology.....	42
2.2.1. Resistance to fragmentation and wear due to friction between particles	42
2.2.2. Methodology of ballast lifespan calculation according to Canadian Pacific Railroads.....	46
2.2.3. Reformation of ballast lifespan calculation methodology.....	47
2.3. Program and methodology of experimentation	49
2.4. Results of experimentation on crushed stone ballast	51
2.5. Conclusions of chapter 2	55
3. EVALUATION OF BALLAST'S PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND LIFESPAN CALCULATIONS	57
3.1. Comparative analysis of factual ballast properties and normative requirements...	57
3.2. Evaluation of ballast lifespan calculation results and classification of ballast mechanical properties	71
3.3. Analysis of mechanical properties indicators classification economic value	78
3.4. Conclusions of chapter 3	81
GENERAL CONCLUSIONS	83
REFERENCES	85
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	93
SUMMARY IN ENGLISH.....	95
ANNEXES ²	111
Annex A. Mining quarries for the crushed stone used in Lithuania's railroad.....	113
Annex B. Experimental testing methodology and equipment.....	117
Annex C. General and graphical results of crushed stone granulometric analysis.....	136
Annex D. Lithuanian railway lines and their train traffic loads.....	144
Annex E. Agreements of co-authors to provide published materials in the thesis.....	146
Annex F. Author's scientific publications on the topic of the thesis.....	156

² Annexes are given in the attached compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Didėjant pervežimų poreikiui, siekiant didžiausio kokybės ir saugumo lygio bei ilgalaikiškumo, vis svarbiau tampa rekonstruojant esamus ar tiesiant naujus geležinkelio kelių teisingai parinkti viršutinės kelio konstrukcijos parametrus. Geležinkelio kelių priežiūrai skiriamas finansavimas labai ribotas, todėl svarbu užtikrinti kuo ilgesnį visų geležinkelio kelio konstrukcijos elementų funkcionavimo laiką.

Geležinkelio kelio balasto prizmei įrengti parinktos mineralinės medžiagos kokybė daro įtaką balasto prizmės savybėms ir visos viršutinės konstrukcijos funkcionavimui. Vertinant mineralinės skaldos tinkamumą balasto sluoksniui įrengti reikia nustatyti visų jos savybių atitikimą norminiams reikalavimams. Tačiau siekiant parinkti geriausią skaldą, kai vertinamos prognozuojamos traukinių eismo apkrovos geležinkelio linijoje, svarbiausiomis tampa balasto mechaninės savybės. Mechaninių savybių rodiklių klasifikavimas, kai vertinamos prognozuojamos traukinių eismo apkrovos geležinkelio linijoje, galimas tik nustatčius mechaninių savybių ryšį su balasto ilgalaikiškumu. Toks klasifikavimas leis parinkti geriausias mechanines savybes turinčią skaldą įvertinant ir jos ilgalaikiškumą.

Disertacijoje pateikiama: sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika, įvertinanti medžiagos fizines ir mechanines savybes bei perspektyvines traukinių eismo apkrovas; eksperimentinis tyrimas, kurio metu atlikti dolomito ir granito skaldos bandymai laboratorijoje; fizinių ir mechaninių savybių tyrimo rezultatų vertinimas. Siekiant suklasifikuoti balasto mechaninių savybių rodiklius, nustatyta savybių įtaka ilgalaikiškumui. Įvertinus eksperimentinių tyrimų rezultatus ir norminių dokumentų analizę, nustatytos ir pasiūlytos taikyti Lietuvos norminiuose dokumentuose balasto savybių leistinos vertės. Pagal sudarytą metodiką vertinamos laboratorijoje tirtų skaldos savybių vertės.

Darbo aktualumas

Prenkant medžiagą balastui įrengti paprastai vertinama jos kaina, granulimetrinė klasė ir atsparumas dėvėjimuisi mikro-Devalio metodu. Tačiau nustatyti po vieną fizinį ir mechaninį rodiklį nepakanka, nes jie pavieniui neparodo medžiagos tinkamumo balastui įrengti. Todėl šiame darbe nagrinėjama balasto medžiagos parinkimo pasaulinė praktika bei jos pritaikymo Lietuvoje galimybės, klasifikuojami balasto svarbiausių mechaninių savybių rodikliai, įvertinant prognozuojamas traukinių eismo apkrovas geležinkelio linijoje. Sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika (toliau BSPM), įvertinanti medžiagos fizines ir mechanines savybes bei leidžianti racionaliai parinkti medžiagas balasto sluoksniui įrengti.

Klasifikavimas grindžiamas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimams skirtu modeliu, kuris susieja medžiagos Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių vertes su ilgalaikiškumu, išreiškiamu pervežta bendra (bruto) mase iki balasto nusidėvėjimo, kuomet reikalingas jo atnaujinimas. Sudarant pirminį (naudotą KRVP) modelį, nebuvo vertinami kelio ruožai, kuriuose balastą paveikė aplinkos veiksniai ir/ar balastas buvo smarkiai užterštas išorinių taršos šaltinių. Pirminis modelis buvo sudarytas nevertinant balasto užsiteršimo smulkiomis dalelėmis dėl pabėgių pamušimo – balasto plūkimo po pabėgiu, atliekamo tarpinių remontų metu, siekiant atstatyti projektinius bėgių kelio geometrinius matmenis. Lietuvos eksploatacinėms sąlygoms skirtas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo modelis (toliau BISM) sudarytas 25 tonų į ašį apkrovai įvertinant pabėgių tipą (mediniai ar gelžbetoniniai). Gaunami rezultatai leidžia apskaičiuoti balasto ilgalaikiškumą, o lyginant skirtingų balasto medžiagų ilgalaikiškumo rodiklius – parinkti tinkamiausią medžiagą tiek ekonominiu tiek ir techniniu požiūriais.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – balasto skaldos fizinės ir mechaninės savybės bei jų įtaka balasto ilgalaikiškumui. Tyrimui naudotos penkios skaldos: dvi dolomito ir trys granito.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – sudaryti moksliškai pagrįstą balasto skaldos parinkimo metodiką, kurioje būtų įvertintos medžiagos fizinės ir mechaninės savybės bei perspektyvinės traukinių eismo apkrovos.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sudaryti geležinkelio kelio balasto skaldos fizinių ir mechaninių savybių vertinimo metodiką.
2. Laboratoriniais bandymais ištirti granito ir dolomito skaldų fizines ir mechanines savybes.
3. Sudaryti balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodiką, kurioje įvertintos jo mechaninės savybės.
4. Suklasifikuoti balasto skaldos Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklius, pateikti rekomendacijas kitų charakteristikų ribiniams dydžiams.
5. Pritaikius sudarytą balasto skaldos parinkimo metodiką, įvertinti granito ir dolomito skaldos panaudojimo geležinkelio balastui įrengti galimybes.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti šie tyrimo metodai: skaldos fizinių savybių nustatymui – granulometrinės sudėties, smulkiųjų dalelių, mineralinių dulkių kiekių, plokštumo, formos ir dalelių ilgio rodiklių nustatymo metodikos, dalelių tankio ir įmirkio nustatymo metodika, užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodika; mechaninių savybių nustatymui – atsparumo dėvė-

jimuisi (mikro-Devalio metodas), atsparumo trupinimui (Los Andželo metodas) ir atsparumo smūgiams tyrimų metodikos.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika, įvertinanti medžiagos fizines ir mechanines savybes bei perspektyvines traukinių eismo apkrovas.
2. Sudaryta balasto (jį sudarančios mineralinės skaldos) ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika, kurioje įvertinti medžiagos Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliai.
3. Pateiktas sudarytos balasto skaldos parinkimo metodikos praktinis taikymas. Skaičiavimams ir vertinimui panaudoti 5-ių skaldų fizinių ir mechaninių savybių laboratorinių bandymų rezultatai.
4. Pateiktos dolomito ir granito skaldos balasto fizinių ir mechaninių savybių rekomendacinės vertės, Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliai klasifikuojami pagal perspektyvines traukinių eismo apkrovas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Nustatytos rekomendacinės fizinių ir mechaninių savybių vertės dolomito ir granito skaldoms.
2. Sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika įvertina medžiagos fizines ir mechanines savybes bei perspektyvines traukinių eismo apkrovas. Pagal šią metodiką įvertinamos skaldos savybių atitiktys rekomenduojamoms reikšmėms bei nustatoma, kokiam traukinių eismo apkrovų intensyvumui esant skalda yra tinkama balastui įrengti.
3. Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikavimas pagrįstas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimais ir leidžia mažiau patvarias medžiagas panaudoti geležinkelio linijose, kuriose traukinių eismo apkrovų intensyvumai yra ne didesni nei 6 mln. t bruto per metus.

Ginamieji teiginiai

1. Vertinant balasto kokybę būtina nustatyti jį sudarančios medžiagos Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių vertes.
2. Balasto skaldos Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklius reikia klasifikuoti pagal traukinių eismo apkrovų intensyvumus.
3. Balasto skaldos fizinių ir mechaninių savybių leistinų dydžių reglamentavimas lemia geležinkelio kelio viršutinės konstrukcijos kokybę ir funkcionavimo laiką.
4. Dolomito skalda yra tinkama naudoti geležinkelio balasto sluoksniui įrengti, kai 25 metų laikotarpyje planuojamas vidutinis metinis traukinių eismo intensyvumas ne didesnis nei 6 mln. t bruto.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos 7 mokslinės publikacijos: viena – mokslo žurnale, įtraukta į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę ir turinčiame citavimo rodiklį (IF) (Vaitkus *et al.* 2014); trys – duomenų bazės „ISI Proceedings“ leidiniuose (Ramūnas *et al.* 2011; Gailienė *et al.* 2012; Ramūnas *et al.* 2014), trys – mokslo žurnaluose, referuojamuose kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Ramūnas 2013; Ramūnas *et al.* 2016; Vitkienė *et al.* 2016).

Disertacijos tema skaityti pranešimai penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 8-oje tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“, 2011 m. Vilnius (Lietuva);
- 12-oje Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologiniuose moksluose – 2012“, 2012 m. Vilnius (Lietuva);
- 2-oje tarptautinėje kelių ir geležinkelių konferencijoje „CETRA 2012“, 2012 m. Dubrovnika (Kroatija);
- 9-oje tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“, 2014 m. Vilnius (Lietuva);
- 4-oje tarptautinėje kelių ir geležinkelių konferencijoje „CETRA 2016“, 2016 m. Šibenikas (Kroatija).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir 6 priedai.

Disertacijos apimtis su santrauka – 111 puslapių be priedų. Tekste panaudota: 11 numeruotų formulių, 43 paveikslai ir 16 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 94 literatūros šaltiniai.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju moksliniam vadovui prof. dr. Alfredui Laurinavičiui už atkaklų vadovavimą, vertingus patarimus, kantrybę ir visokeriopą pagalbą studijuojant doktorantūroje bei rengiant disertaciją. Esu labai dėkingas prof. dr. Audriui Vaitkui už suteiktas vertingas mokslines konsultacijas, idėjų generavimą ir optimizmo palaikymą. Taip pat dėkoju doc. dr. Viktorui Vorobjovui už patarimus ir pasiūlymus planuojant tyrimus laboratorijoje. Reiškiu padėką disertacijos ekspertams prof. habil. dr. Henrikui Sivilevičiui ir doc. dr. Virgaudui Puodžiui, pateikusiems labai vertingų patarimų bei pastebėjimų.

Dėkoju VGTU Kelių katedros kolegoms ir Kelių tyrimo institutui už bendradarbiavimą, pagalbą ir palaikymą, artimiesiems ir draugams už paramą, kantrybę bei supratingumą doktorantūros studijų metu.

Geležinkelio balasto savybių vertinimo pasaulinė praktika

Skyriuje pateikiama literatūros apžvalga. Analizuojamos ir apibendrinamos geležinkelio kelio balasto funkcijos ir jam keliami reikalavimai. Nagrinėjami moksliniai tyrimai apie balasto degradacijos priežastis ir pasekmes, šiuo metu taikomą balasto skaldos parinkimo pasaulinę praktiką. Vertinama balasto būklė Lietuvos geležinkelių linijose pagal autoriaus atliktus duomenų tyrimus.

Skyriaus tematika paskelbtos penkios publikacijos (Ramūnas *et al.* 2011, Gailienė *et al.* 2012; Ramūnas 2013; Vaitkus *et al.* 2014; Vitkienė *et al.* 2016).

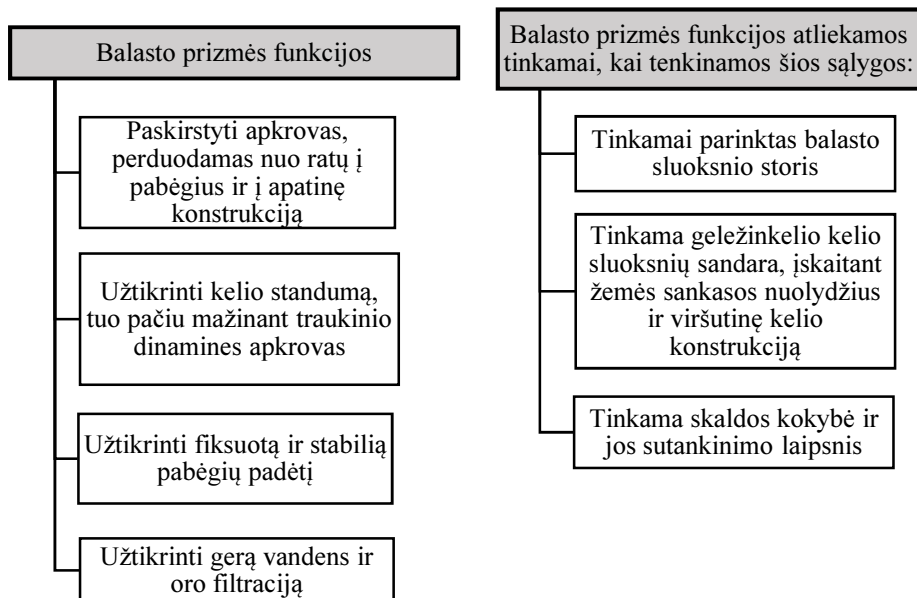
1.1. Balasto funkcijos ir jam keliami reikalavimai

1.1.1. Balasto prizmė ir jai keliami reikalavimai

Balastas – tai ant sankasos pilamos birios, rupios mineralinės medžiagos sluoksnis. Jis skirtas išskirstyti pabėgių perduodamas statines bei dinamines

apkrovas į žemės sankasą. Taip pat balastas atlieka drenavimo bei amortizavimo funkcijas. Balastas daro didelę įtaką geležinkelio kelio kokybei ir stiprumui, todėl jam keliama daug ypatingų reikalavimų.

Kai bėgių, sąvaržų ir pabėgių parametrai yra tinkami, tai balastas yra silpniausias elementas šioje sistemoje. Tam, kad balastas tinkamai atliktų savo funkcijas, jo sudėtis turi atitikti medžiagų vienalytiškumo ir granulimetrinės sudėties reikalavimus.

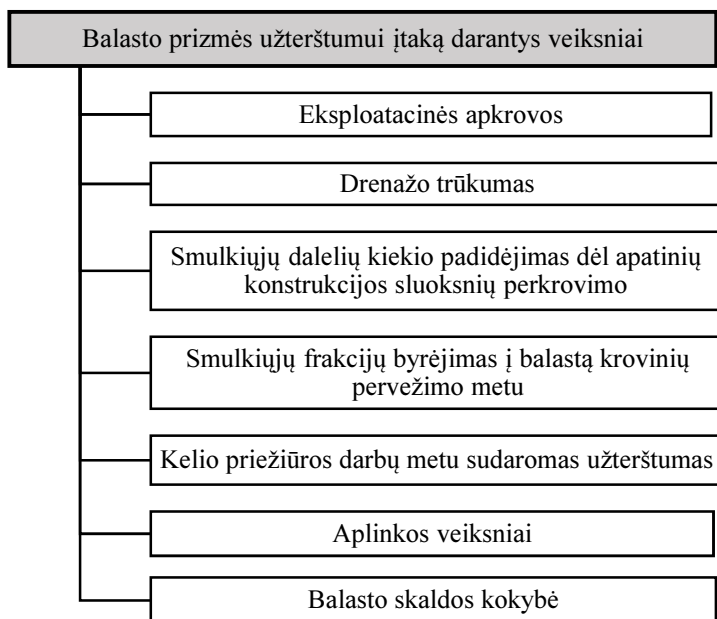


1.1 pav. Balasto prizmės funkcijos ir sąlygos jų tinkamam atlikimui
(Klotzinger 2008a, Klotzinger 2008b)

Fig. 1.1. Prism ballast functions and conditions their proper performance
(Klotzinger 2008a, Klotzinger 2008b)

Balasto prizmės funkcijos (1.1 pav.) atliekamos tinkamai, kai tenkinamos pagrindinės sąlygos, o skaldos kokybė yra svarbiausias veiksnys, lemiantis balasto sluoksnio nusėdimus. Geležinkelio kelio ilgalaikiškumas ir matmenys labai priklauso nuo balasto sluoksnio nusėdimo (ypač pradinio eksploatacijos laikotarpiu), užterštumo, standumo, vienalytiškumo (tos pačios rūšies balastas, ta pati frakcija, be priemaišų).

Balasto prizmės kokybę labai mažina tarša, kuri priklauso nuo veiksmų, pateiktų 1.2 paveiksle.



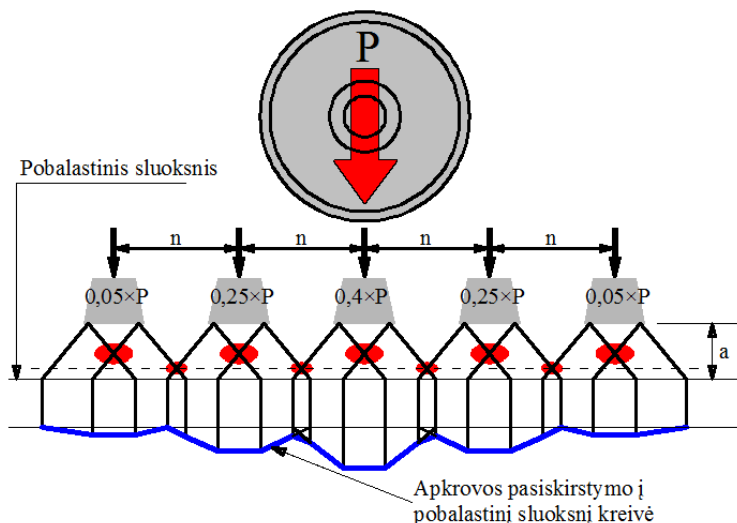
1.2 pav. Balasto prizmės užterštumui įtaką darantys veiksniai
(Klotzinger 2008a, Klotzinger 2008b)

Fig. 1.2. Factors affecting contamination of ballast prism
(Klotzinger 2008a, Klotzinger 2008b)

Jeigu visi šių veiksnių (1.2 pav.) rodikliai atitinka norminiuose dokumentuose reglamentuojamas leidžiamas reikšmės, tuomet yra užtikrinamas nepertraukiamas ir saugus sistemos „riedmenys – bėgiai“ darbas.

Balasto prizmės parametrai turi būti parinkti (apskaičiuoti) taip, kad judančio sąstato apkrovos, perduodamos bėgiams per pabėgius į balastą, pasiskirstytų kuo tolygiau į geležinkelio kelio žemės sankasą. Sąstatui važiuojant geležinkelio keliu, atsiranda vertikaliniai įtempimai, tačiau geležinkelio balasto eksploatacijos metu jį veikia tiek statinės, tiek ir dinaminės apkrovos.

Pagrindiniai veiksniai, kurie nulemia normalią balasto prizmės eksploataciją, yra balasto sluoksnių storis ir žemės sankasos drenavimo savybės (iš jų ir skersinis žemės sankasos nuolydis). Balasto prizmės stabilumui didelės reikšmės turi jos atsparumas skersiniams postūmiams.



1.3 pav. Koncentruotos apkrovos pasiskirstymo per pabėgius schema (Klotzinger 2008b), čia P – ašies apkrova; n – atstumas tarp pabėgių ašių; a – balasto sluoksnio storis

Fig. 1.3. Concentrated load distribution through sleepers (Klotzinger 2008b), where P – axle load; n – distance between the sleepers axes; a – ballast layer thickness

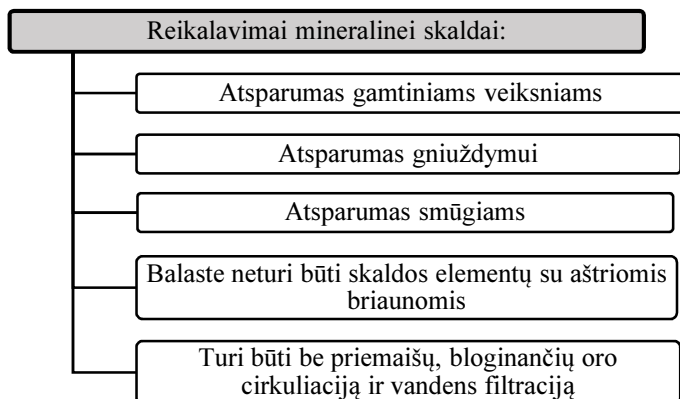
Tam, kad užtikrintume kuo palankesnes eksploatacinių apkrovų perdavimo į apatinę kelio konstrukciją sąlygas, reikia didinti balasto sluoksnio storį (a) po pabėgių ties bėgiu (Klotzinger 2008b). Balasto sluoksnio storis turi būti toks, kad apkrovų pasiskirstymo linijos susikirstų virš pobalastinio sluoksnio. Tai iliustruoja 1.3 paveiksle pateikta schema. Priešingu atveju, žemės sankasos plotams, patenkantiems į apkrovų susikirtimo zonas, atiteks didesnė dalis paskirstytos apkrovos. Dėl šios priežasties sankasos deformacijos gali didėti.

Balasto sluoksnio storis (a) priklauso nuo atstumo tarp pabėgių, pabėgių pločio ir nuo apkrovų pasiskirstymo kampo. Pagal standartus (IST 1005384–2:2011, 2011; K/111, 2000; SNip 32-01-95, 2012) galima teigti, kad esant apkrovai į ašį 25 t (1.3 paveiksle žymima simboliu P), atstumui tarp pabėgių – 60 cm (n) ir pabėgio pločiui – 26 cm, balasto sluoksnio storis (a) turi būti 30 cm. Ruožuose, kuriuose važiuoja greitieji traukiniai a turėtų būti 35–40 cm.

Balasto prizmės viršaus plotis daro įtaką pabėgių horizontaliųjų poslinkių suvaržymui. Šis suvaržymas bus tuo didesnis, kuo didesnis balasto prizmės peties plotis (Le Pen and Powrie 2010; Zakeri *et al.* 2012). Vidutiniškai balasto prizmės peties plotis turi būti 35–45 cm.

1.1.2. Reikalavimai balasto skaldai

Mineralinei skaldai, kuri naudojama balasto sluoksniui įrengti, yra keliami daug reikalavimų. Jų skirstymas į grupes pateiktas 1.4 paveiksle (Klotzinger 2008b).



1.4 pav. Reikalavimai mineralinei skaldai (Klotzinger 2008b)

Fig. 1.4. Requirements for mineral crushed stone (Klotzinger 2008b)

Šios savybės nustatomos atliekant standartizuotus laboratorinius tyrimus, reglamentuotus standarte LST EN 13450:2013 „Geležinkelio balasto mineralinės medžiagos“.

Apkrautas balastas didesniąja dalimi susideda iš tokių pat dalelių, kurios sudarė balastą, atvežtą į geležinkelio kelio tiesybos vietą. Dėl apkrovų poveikio balaste atsiranda smulkesnių dalelių ir visai smulkių. Nepakitusios dalelės sudaro balasto prizmės skeletą (Klotzinger 2008b).

Veikiant traukinių apkrovoms, šiose dalelėse atsiranda įtempimai. Kai bėgiu riedantis ratas atsiranda padėtyje tarp pabėgių, jis sąlygoja pabėgių pasikėlimą. Kai ratas nurieda ties pabėgiu, pastarasis staigiai nusileidžia į balastą. Staigus pabėgio nusileidimas skatina balasto dalelių skilimą kontakto su pabėgiu vietose.

Suskilusios dalelės padidina pabėgių atsparumą poslinkiams. Tačiau laikui bėgant ir veikiant apkrovoms, šių dalelių kiekis padidėja. Papildomai susidaro dar smulkesnės dalelės. Veikiant apkrovų ciklams atskilusios dalelės tarsi apgaubia pagrindines skeletą formuojančias daleles. Todėl sumažėja balasto vidinės trinties kampas, balasto atsparumas poslinkiams, kartu ir balasto stabilumas (Kabo 2006).

Smulkiausiosios dalelės, susidedančios iš priemolio ir molio, gali prasi-skverbti į balasto prizmę iš apsauginio sankasos sluoksnio ir balaste padidinti užterštumą, t.y. dar labiau pabloginti jo granulimetrines savybes.

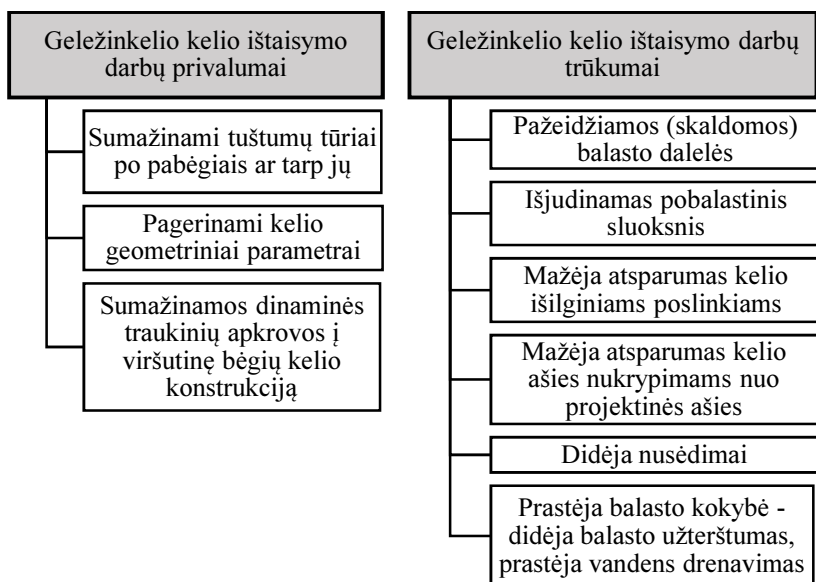
1.2. Balasto degradacijos priežastys ir pasekmės

1.2.1. Kelio priežiūros technologinių operacijų įtaka balasto degradacijai

Eksplloatuojamas kelias dėl pasikartojančių apkrovų nuolat juda vertikaliai ir horizontaliai. Šios deformacijos nėra visiškai grįžtamos, todėl lemia nukrypimus nuo numatytų geometrinių parametrų. Šie nukrypimai yra netolygūs, t. y. viršutinė kelio konstrukcija vienose vietose deformuojasi daugiau negu kitose (Arasteh *et al.* 2014). Tokios deformacijos sumažina važiavimo sklandumą (Maskeliūnaitė and Sivilevičius 2012), padidėja kelių veikiančios dinaminės jėgos, kurios dar labiau skatina geležinkelio kelio geometrinių parametrų nuokrypių vystymąsi. Praktikoje dažniausiai tokie defektai ištaisomi pamušant kelią (Famurewa *et al.* 2015). Pamušimas – tai kelio pakėlimas ir skersinis pastūmimas (richtavimas) į reikiamą padėtį, tuo metu perstumiant balastą viršutinėje jo dalyje tam, kad sumažintų tuštumų tūrį po pabėgiais ar tarp jų.

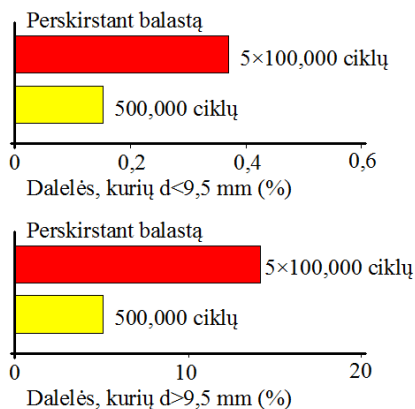
Kelio ištaisymas galimas tiek rankiniu būdu pakeliant kelią domkratais ir naudojant elektrinius vibruojančius plūkimo prietaisus, tiek mechanizuotai, naudojant kelio ištaisymo mašinas. Naudojant kelio ištaisymo mašinas kelias ištaisomas greitai, tačiau yra ir neigiamų veiksnių. Geležinkelio kelio ištaisymo darbų privalumai ir trūkumai pateikti 1.5 paveiksle (Selig and Waters 1994). Čia išvardinti trūkumai lemia vis prastesnę balasto laikomąją galią, todėl ištaisymas reikalingas vis dažniau. Galiausiai reikalingas balasto valymas arba keitimas (Vale and Ribeiro 2014).

Taisant balastą, plūkimo prietaiso antgaliai įkišami į skaldos balastą ir skaldos balastas pastumiamas po pabėgiu. Šis stūmimas sukelia skaldos dalelių skilimą, nes balastas stumiamas su didele jėga. Vykstant šiam procesui, balastas patiria stiprią vibraciją, nes plūkimo prietaisai vibruoja, kad būtų užtikrintas geresnis skaldos sutankinimas po pabėgiu. Šis procesas neišvengiamai išjudina balastą, esantį tarp pabėgių. Kadangi balastas yra išjudintas, pasikeičia skaldos dalelių kontaktų taškai ir po pirmųjų riedmenų eismo sukeltų apkrovų dalis balasto yra suskaldoma.



1.5 pav. Geležinkelio kelio ištaisymo darbų privalumai ir trūkumai (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.5. Advantages and disadvantages of track rectification works (Selig and Waters 1994)

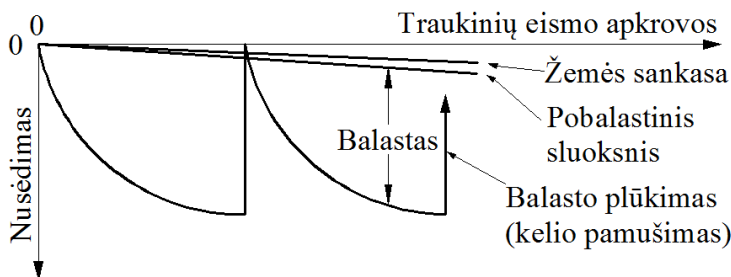


1.6 pav. Balasto dalelių persiskirstymo įtaka smulkių dalelių susidarymui (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.6. Ballast particle distribution's influence on the formation of fine particles (Selig and Waters 1994)

Smulkiųjų dalelių persiskirstymo įtakos smulkiųjų dalelių susidarymui tyrime (Selig and Waters 1994) nebuvo naudojami plūkimo prietaisai. Buvo atliekamas tik balasto išjudinimas, kurio metu persiskirstydavo balasto dalelės. Dėl šio persiskirstymo pasikeisdavo dalelių kontaktų vietos. 1.6 paveiksle pateikiama, kiek toks persiskirstymas daro įtakos balasto dalelių smulkėjimui. Jame matyti, kad 500 000 apkrovų ciklą nepertraukiamai paveiktas balastas turi dvigubai mažiau smulkios (dalelės mažesnės nei 9,5 mm) ir beveik trigubai mažiau stambios (dalelės didesnės nei 9,5 mm) frakcijos lūžusių dalelių negu balastas, kuris patyrė tokį pat apkrovų skaičių, tik buvo išjudintas kas 100 000 apkrovų ciklų.

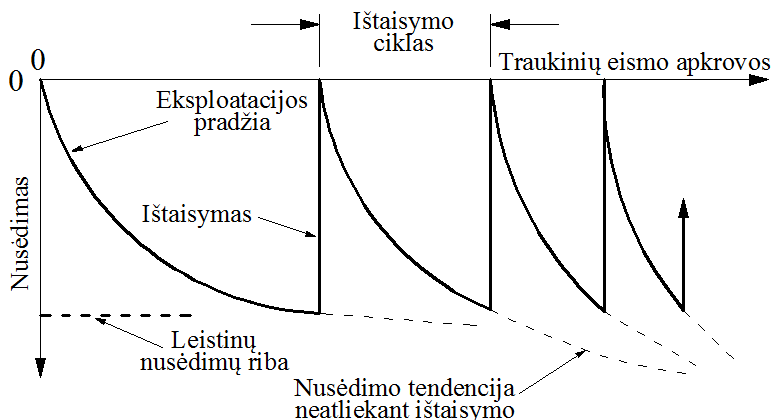
Pasikartojančios apkrovos naujai paklotame kelyje sukelia reikšmingas negrįžtamas deformacijas balaste, pobalastiniame sluoksnyje, sankasoje. Tačiau jei kelias yra seniai eksploatuojamas, sankasos ir pobalastinio sluoksnio deformacijos yra pakankamai mažos (Selig and Waters 1994). Kelio geometriniai parametrai daugiausiai kinta dėl skaldos balasto plastinių deformacijų po kelio geometrijos ištaisymo plūkant balastą (1.7 pav).



1.7 pav. Kelio konstrukcijos elementų nusėdimai (schema) (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.7. Substructure contributions to settlement (scheme) (Selig and Waters 1994)

Siekiant užtikrinti geresnį balasto sutankinimą po kelio ištaisymo ir sumažinti deformacijų vystymąsi, galima naudoti specialią mašiną, vadinamą dinaminio kelio stabilizatoriumi (angl. *dynamic track stabilizer*). Jos veikimo principas pagrįstas sinchronizuota horizontalia vibracija, perduodama per specialiai po kelio mašiną įtaisytus vežimėlius. Vibracijos dažnis reguliuojamas nuo 0 iki 45 Hz, o sukuriamos išcentrinės jėgos siekia 320 kN. Ši kelio mašina naudojama po kelio pamušimo mašinos. Jos atliktas darbas prilygsta 100 000 tonų eisimui. Atlikus kelio ištaisymo darbus naudojant dinaminį kelio stabilizatorių, kelias tampa dvigubai atsparesnis šoniniam poslinkiui negu kelias, kuri stabilizatorius nenaudotas (Zakeri 2012; Zakeri *et al.* 2016).



1.8 pav. Progresuojančios taršos įtaka plūkimo ciklui (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.8. Effect of progressive fouling on length of tamping cycle
(Selig and Waters 1994)

Balasto plastinės deformacijos auga dėl dalelių trupėjimo ir skersinių dalelių poslinkių veikiant apkrovai. Esant stambioms dalelėms, jų skersinis poslinkis yra ribojamas liekamųjų horizontalių įtempių, kurie susidaro nuo pakartotinių apkrovų sutankėjus balastui. Atliekant pamušimą, šie įtempiai išnyksta. Balasto deformacija vyksta iki dalelių sutankėjimo nuo eismo apkrovų. Viena iš balasto deformacijos pasekmių yra ertmės, atsiradusios tarp pabėgio apačios ir balasto. Šios ertmė taip pat gali atsirasti pakilus bėgiui prieš važiuojantį traukinį. Traukiniui važiuojant per tokią vietą, nuo artėjančio rato susidaro papildomos apkrovos, patiriamas smūgis (Eisenmann 1976). Jei ertmė užsipildo vandenių ir smulkiomis dalelėmis, prasideda stipri erozija. Šie procesai dar labiau paspartina deformacijų vystymąsi ir balasto degradaciją (Selig and Waters 1994). Po kiekvieno kelio ištaisymo kelio deformacijos vyksta vis sparčiau. Tai reiškia, kad leistinųjų nusėdimų riba pasiekama greičiau, o kelio ištaisymo ciklai trumpėja (1.8 pav.).

1.2.2. Balasto taršos šaltiniai

Eksplatuojant geležinkelį balasto pirminės savybės nuolat prarandamos. Be jau ankščiau aptarto balasto dalelių skilimo ir smulkėjimo, yra žinoma kita balasto degradacijos priežastis – užterštumas (Villarejo *et al.* 2016). Balasto užterštumas kaip reiškiny, yra žinomas jau seniai. Kartais balasto užterštumas išauga iki labai aukšto lygio, susidaro išplovos. Todėl stipriai sumažėja kelio laikomoji geba, išauga kelio nuokrypiai nuo nustatytų parametrų (Selig *et al.*

1988; Al-Qadi *et al.* 2010; Plati *et al.* 2010). Šiaurės Amerikoje buvo išanalizuota 30 geležinkelio ruožų. Mėginių vietos buvo parinktos siekiant apimti įvairias balastui naudojamas medžiagas, gruntines bei klimatinės sąlygas bei eismo intensyvumą. Daugiau negu pusėje šių bandinių nustatytas balasto užterštumas. Išnagrinėjus bandinius, paimtus iš balasto, pobalastinio sluoksnio, sankasos, buvo įvertinti skirtingi balasto užsiteršimo mechanizmai ir priežastys. Ankščiau (Klassen *et al.* 1987) buvo įvardijami trys balasto užterštumo šaltiniai: užterštumas iš išorės, balasto užteršimas pobalastiniuose sluoksniuose esančiomis medžiagomis ir užterštumas dėl balasto dalelių trupėjimo. Atlikti tyrimai (Selig and DelloRusso 1991) parodo, kad balasto užterštumo priežastis tikslinga skirstyti į penkias kategorijas:

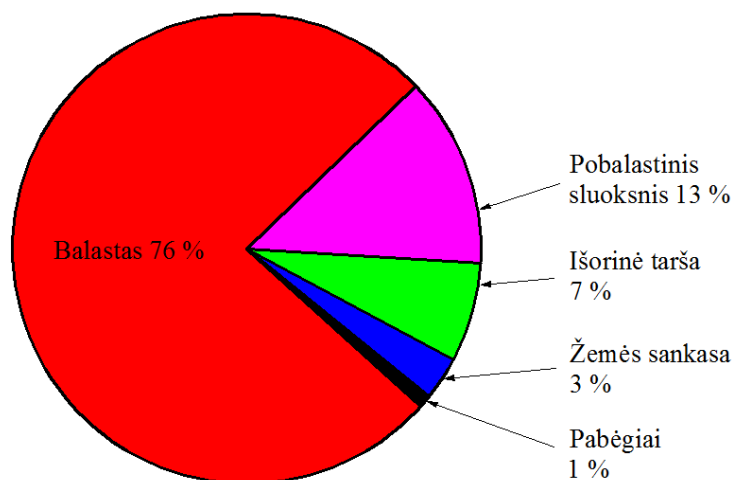
- I. Balasto dalelių smulkėjimas.
- II. Tarša iš išorinių šaltinių.
- III. Pabėgių (medinių) liekanos.
- IV. Pobalastinio sluoksnio skverbimasis į balastą.
- V. Sankasos gruntų skverbimasis į balastą.

Balasto dalelių smulkėjimas – tai stambiųjų dalelių skilimas į smulkesnes. Didžiausią įtaką šiam procesui turi kelio konstrukcijai tenkanti apkrova ir staugų įmirkusio balasto užšalimas. Balasto transportavimas ar pamušimas po pabėgiais taip pat daro didelę įtaką balasto dalelių skilimui. Užteršimas iš išorės – dažniausiai iš vagonų byrantys kroviniai ar paviršinių (lietaus) vandenų ar vėjo nešamos smulkiosios dalelės (Griffin *et al.* 2014; Sadeghi and Askarinejad 2012). Trečiasis taršos šaltinis – nekokybiškų medinių pabėgių atplaišos (pastarųjų neraskite kelyje su gelžbetoniniais pabėgiais). Visi šie trys taršos šaltiniai didina balasto užterštumą nepriklausomai nuo sankasos ar pobalastinio sluoksnio savybių, jų stiprumo, ar savybes gerinančių priemonių (geotekstilės, drenazo) naudojimo. Kiti du veiksniai siejami su sluoksnių, esančių žemiau balasto, dalelių patekimu į balasto sluoksnį. Šio proceso priežastimis dažniausiai būna prastas arba nepakankamas vandens drenavimas bei trūkumas priemonių, apsaugančių nuo sluoksnių maišymosi. Pobalastinio sluoksnio įrengimui naudojamų medžiagų savybės taip pat labai svarbios dėl vandens drenavimo, apkrovų tolygaus perdavimo į sankasą bei atskyrimo nuo sankasos sluoksnio (Navikas *et al.* 2016).

Balasto dalelių smulkėjimas. Dalelių smulkėjimas yra pagrindinė balasto užsiteršimo priežastis, sudaranti vidutiniškai 76 % balasto taršos (1.9 pav.) (Selig and Waters 1994). Kitas pakankamai stiprus taršos šaltinis yra pobalastinio sluoksnio skverbimasis į balastą. Dominuojantis balasto taršos šaltinis yra paties balasto smulkėjimas. Būtent dėl šios priežasties balastui keliami dideli at-

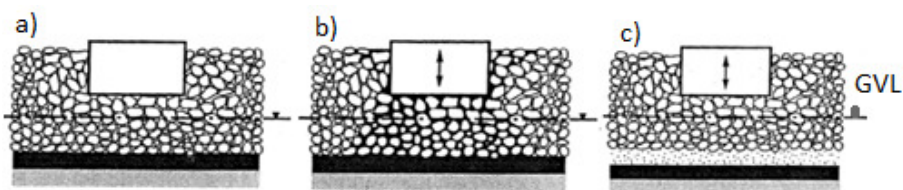
sparumo reikalavimai. Taip siekiama sumažinti balasto užterštumą ir jo sukeliamas neigiamas pasekmes eksploatuojant geležinkelį.

Balasto tarša iš žemiau esančių sluoksnių. Rekonstruojant ar statant geležinkelio kelią ant žemės sankasos turi būti įrengiamas pobalastinis sluoksnis. Jo neteisingas įrengimas arba visiškai neįrengimas gali stipriai padidinti anksčiau aptartą balasto taršą iš apatinių sluoksnių (Selig and Waters 1994). Sankasos grunto sluoksniams neatlaikius apkrovos gali susiformuoti staigus ir stiprus lokalinis balasto užterštumas (dažniausiai esant vandeniui). Dažniausiai tai būna išplovos. Esant ciklinėms apkrovoms, susidaro tiršta, klampi mineralinių medžiagų masė, kuri skverbiasi į balastą. Tokie procesai dažniausiai vyksta tose vietose, kur sankasą sudaro smulkios, vandens nepraleidžiančios dalelės, tokios kaip molis, kreida, klintys (Griffin *et al.* 2014).



1.9 pav. Balasto taršos šaltinių pasiskirstymo diagrama (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.9. Sources of ballast fouling for all sites combined (Selig and Waters 1994)



1.10 pav. Apatinių sluoksnių sąveikia su balastu (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.10. Interaction of the lower layers and the ballast (Selig and Waters 1994)

1.10 paveikslo a) dalyje rodoma, kaip pabėgis įrengtas ant tinkamo balasto, tačiau apatiniai sluoksniai sulaiko vandens pasišalinimą. Tokiu atveju gruntinio vandens lygis (1.10 paveiksle žymimas GVL) yra aukščiau sankasos sluoksnio, apsemiama dalis balasto. 1.10 paveikslo b) dalyje rodoma, kaip užteršiamas balastas dėl purvo išpumpavimo į paviršių. Tinkamai įrengus pobalastinį sluoksnį (1.10 paveikslo c) dalis) galima užkirsti kelią šiems reiškiniams. Ankstesni tyrimai (žiūrėti 1.4 poskyrį) rodo, kad senai nutiestuose ar remontuotuose geležinkelio ruožuose ne visur (tinkamai) įrengtas pobalastinis sluoksnis, turintis apsaugoti nuo išplovų susidarymo.

Balasto užterštumo rodikliai. Balastą užteršiančiomis medžiagomis laikomos dalelės, praeinančios pro 9,5 mm sieta (Selig and Waters 1994). Taršos indeksas buvo apibūdinamas kaip dalelių, praeinančių pro 4,75 mm ir 0,075 mm sietus, procentinė suma. Šis apibūdinimas tinkamai neatspindėjo tikrojo balasto užterštumo apibrėžimo, nes balastas gali būti užterštas skirtingo tankio medžiagomis (pvz.: anglis ar sutrupinta uoliena). Todėl buvo imtas taikyti kitas apibrėžimas: PTU – Procentinis tuštymių užterštumas (Feldman and Nissen 2002). Jį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$PTU = V_{vf} / V_{sb}. \quad (1.1)$$

Čia V_{vf} – medžiagos, užteršiančios balastą, tūris, m^3 ; V_{sb} – pradinis tuštymių tūris švariame balaste, m^3 .

Parametras V_{vf} turi būti perskaičiuotas sutankinus balastą teršiančias medžiagas ir ne visada parodo tikrąjį balasto užterštumo lygį eksploatuojamame geležinkelyje. Atsižvelgiant į tai, buvo pasiūlytas kitas parametras: TUI – tuštymių užterštumo indeksas. Jis buvo sukurtas siekiant tiksliai nustatyti skirtingų teršiančiųjų medžiagų įtaką balasto užterštumui ir skaičiuojamas taip:

$$TUI = V_f / V_{vb} \times 100. \quad (1.2)$$

Čia V_f – teršiančių medžiagų tikrasis tūris balasto tuštumose, m^3 ; V_{vb} – švaraus balasto tuštumų tūris, m^3 .

Formulė (1.2) gali būti perrašyta tūrius pakeičiant juos apibūdinančiais gruntų parametrais:

$$TUI = (1 + e_p) / e_b \times G_{sb} / G_{sf} \times M_f / M_b. \quad (1.3)$$

Čia e_f – švaraus balasto tuštymėtumo koeficientas; e_b – teršiančios medžiagos tuštymėtumo koeficientas; G_{sb} – švaraus balasto lyginamasis svoris, kg; G_{sf} – teršiančios medžiagos lyginamasis svoris, kg; M_f – sausa teršiančios medžiagos masė, kg; M_b – sausa švaraus balasto masė, kg.

Tyrimai parodo (Tennakoon *et al.* 2014), kad balastas nepriimtinau drenuojamas tampa tuomet, kai tarša smulkiausiomis dalelėmis (moliu ar jam artimos konsistencijos mišiniais) siekia daugiau nei $TUI > 35\%$. Deja, Lietuvoje užterštumas matuojamas teršalų kiekiu (procentais) nuo bendros balasto prizmės masės, todėl negalima jo lyginti su TUI rodikliu, kuris vertina teršalų ir balasto tūrių santykį.

Užteršto balasto savybės ir elgsena. Smėlio ir smulkaus žvyro dydžio dalelės, esančios balaste, padidina jo stiprumą, standumą bei atsparumą plastinėms deformacijoms. Tačiau yra ir neigiamų šio reiškinio savybių: sumažėjęs tamprusmas bei tuštymėtumas. Pamažu užsipildant tuštumoms mažėja ir vandens pralaidumas, tačiau išlieka pakankamas kol neužpildyta didžioji dauguma tuštumų. Balasto tuštumų užpildymo smėlio arba smulkaus žvyro dalelėmis teigiamos savybės išlieka tik jei stambiosios dalelės tarpusavyje tiesiogiai kontaktuoja ir sudaro balasto skeletą.

1.11 paveiksle schematiškai pateiktos skirtingos balasto būsenos: kairėje – švarus balastas; viduryje – nestipriai užterštas balastas; dešinėje – stipriai užterštas balastas, kurio stambiosios dalelės yra praradusios tiesioginį tarpusavio kontaktą.



1.11 pav. Skirtingos balasto būsenos (Selig and Waters 1994)

Fig. 1.11. Different condition of the ballast (Selig and Waters 1994)

Paprastai balasto užterštumas bėgių sandūrų zonoje būna didesnis negu kitose vietose. To priežastys yra dinaminių jėgų padidėjimas, bėgių aukščių nesutapimai sandūrose, netinkami protarpių dydžiai ar sandūrų defektai (Mandal *et al.* 2016).

Dėl sandūrų vietose atsiradusių defektų atliekami kelio priežiūros darbai. Tai atliekama pakeliant kelią į reikiamą aukštį ir pamušant balastą po juo. Tačiau pats pamušimo procesas sukelia balasto dalelių trupėjimą, o šis procesas yra viena pagrindinių balasto užterštumo priežasčių (Wright 1983, Arasteh

et al. 2016). Nustatyta, kad vieno pamušimo ciklo metu ties vienu pabėgiu susidaro 2–4 kg dalelių, smulkesnių negu 14 mm.

Ne mažiau svarbi problema – pabėgių dėvėjimasis dėl balasto taršos sukeliamų reiškinių (Oregui *et al.* 2016). Labai ryškus defektų atsiradimas dolomito skaldoje buvo pastebėtas ties bėgių sandūromis (Holmes 1971). Dolomito dalelės susmulkinamos iki miltelių pavidalo, kurios kartu su vandeniu sudaro klampią masę, dėl kurios prasideda balasto ir pabėgio erozija, atsiranda tarpas po pabėgiu. Šiuose tarpuose esanti masė dažniausiai būna sudaryta iš dalelių nuo 10 mm iki molio dalelių dydžio (Johnson 1982). Manoma, kad pabėgio ir balasto dalelių dilimas labai progresuoja dėl hidraulinį procesų po pabėgiais, kur susidaro tarpai (Klassen *et al.* 1987).

Esant pakankamam užterštumo kiekiui, ženkliai suprastėja vandens pralaidumas. Tuomet po pabėgiu susidaro vandens kišenės. Veikiant apkrovoms, vanduo kartu su smulkiosiomis dalelėmis sukuria stiprų slėgį į pabėgį ir cirkuliuoja iš vandens kišenės po pabėgiu į pabėgio paviršių. Čia apkrovos greitis turi didesnę įtaką pabėgių erozijai negu apkrovos dydis, todėl išplovų problema dažniau atsiranda pagrindiniuose keliuose, kur yra didesni greičiai (Waters 1974). Šio hidraulinės erozijos proceso pradžią gali veikti ir kiti taršos šaltiniai, pvz., paviršinis lietaus vanduo.

Prasidėjus procesui, balasto dalelės išstumiamos iš pabėgių kraštų. Atsiradus tarpui tarp pabėgio kraštų ir balasto, smarkiai sumažėja kelio stabilumas horizontaliomis kryptimis. Išstumiamas vanduo su įvairiomis dalelėmis yra pakankamai abrazyvus, kad sukeltų net gelžbetoninių pabėgių eroziją taip apnuogindamas pabėgio armatūrą. Mediniai pabėgiai taip pat pažeidžiami, tačiau jų liekanos nėra tokios abrazyvios kaip gelžbetoninių pabėgių. Nors šis procesas dažnai prasideda sandūrų lokalinėse vietose, tačiau dėl savo hidraulinės kilmės dažniausiai išplinta. Šio proceso pagrindinės priežastys yra (Burks *et al.* 1975):

- prastas vandens nubėgimas;
- betoninių pabėgių sukeliami dideli įtempiai į skaldos balastą;
- prastas balasto atsparumas dėvėjimuisi;
- tuštuma po pabėgiu, sukelianti smūgį su hidrauliniais procesais.

Pastebima, kad šis procesas turi gebėjimą „ištraukti“ purvą iš žemiau esančių sluoksnių. Todėl pasislinkus balaste esančiomis dalelėmis tarpas po pabėgiu padidėja, kas sąlygoja vis spartėjantį šio proceso vystymąsi.

Augant balasto užterštumui didėja balasto nusėdimai, prasideda stipri balasto degradacija (Augustin *et al.* 2003). Tarpelis po pabėgiu taip pat žymiai spartina teršiančiųjų medžiagų atsiradimą, todėl labai svarbu imtis prevencinių priemonių neleisti susidaryti tarpeliams tarp pabėgio ir balasto (Varandas *et al.* 2016).

1.2.3. Balasto savybių įtakos geležinkelio kelio degradacijai tyrimai

2000 metais Australijoje buvo sukurta integruota kompiuterinė priemonė bėgių kelio elgesio prognozavimui besikeičiančioms eismo sąlygoms (Zhang *et al.* 2000). Šiame geležinkelio kelio degradacijos modelyje įvertinamos bėgių kelio komponentų tarpusavio sąveikos. Modelis naudoja mechanistinius ryšius ir apima visus pagrindinius veiksnius, kurie gali daryti įtaką bėgių kelio komponentų eksploatacijos laikui. Modelio pritaikymo realioms sąlygoms rezultatai parodo, kad ašies apkrovų ir traukinio greičio didinimas labai pagreitina bėgių kelio degradaciją, ir ypačingai bėgio nusidėvėjimą.

2004 metais Švedijoje buvo pateikti geležinkelio kelio priežiūros tyrimų projekto rezultatai (Larrson 2004). Pagal surinktą informaciją apie tyrimus atliktus šioje srityje buvo sudarytas ir išvystytas geležinkelio kelio degradacijos prognozavimo modelis DeCoTrack (ang. Degradation Cost of Track). Šis modelis imituoja kelio degradacijos greičio (lygio) kitimą priklausomai nuo eismo parametrų pokyčio, o išeitiniai modelio duomenys – prognozuojama bėgių kelio tinkamumo eksploatacijai trukmė ir degradacijos pasekmių šalinimo (priežiūros, remontų) kaštai tam laikotarpiui. Šio tyrimų projekto rezultatai patvirtino 2000 metais Australijoje (Zhang *et al.* 2000) atliktų tyrimų rezultatų pagrįstumą ir ypatingai didelę svarbą taikyti šiuos modelius Lietuvos geležinkelių infrastruktūros priežiūros tobulinimo procese.

Portugalijoje 2008 metais buvo parengtas integralus metodas priimti sprendimus dėl geležinkelių infrastruktūros komponentų (konkrečiau balasto prizmės ir bėgių) atnaujinimo (Andrade 2008, Caetano ir Texeira 2015). Šiame metode išskiriami atskiri gyvavimo ciklo išlaidų (toliau GCI) modeliai bėgiams ir balastui. Bėgių GCI modeliui naudojamas anksčiau sukurtas modelis, o balasto GCI modelis sudarytas naujai ir paremtas kelio geometrijos degradacijos modeliu.

Australijoje 2005 metais buvo atlikti tyrimai balasto degradacijai išanalizuoti ir nustatyti trūkumus taikomuose balasto užterštumo lygio nustatymo methoduose (Ionescu 2005). Šie tyrimai ir jų rezultatai aktualūs įvertinant Lietuvos geležinkelio linijų balasto sluoksnio užterštumo statistinius duomenis, nes iki šiol užterštumui nustatyti buvo naudojama pasenusi technologija, užterštumas buvo vertinamas netiksliai, dideliais reikšminiais intervalais.

Dėl klimatinių sąlygų Lietuvos geležinkelių linijoms ypatingai svarbus tyrimas buvo atliktas 2005 metais Suomijoje (Nurmikolu 2005). Šiuo atveju be balasto skaldos degradacijos ir šio proceso priežasčių buvo ištirtas ir degradavusios skaldos jautrumas šalčiui.

Lietuvoje projektiniai sprendiniai dažnai būna grindžiami „patirtimi“ arba kaimyninių valstybių praktika. Tai reiškia, kad yra ignoruojami skirtumai tarp klimatinų sąlygų, eksploatacinių parametrų. Be to, nėra taikomos inovatyvios technologijos, o tai lemia šiandieninį Lietuvos geležinkelių transporto sektoriaus atsilikimą nuo Europos Sąjungos geležinkelių transporto sistemų techniniu ir ekonominiu požiūriais.

Norint pasinaudoti pasaulio mokslininkų atliktų darbų rezultatais ir juos plėtoti reikia investuoti į šiuolaikišką laboratorinę įrangą. Tai būtų galimybė pritaikyti Lietuvos sąlygoms ir plėtoti laboratorinius geležinkelio balasto triašių ciklinių apkrovų tyrimų metodus bei įrangą (Brown *et al.* 2004; Lackenby 2006; Aursudkij 2007; Aursudkij *et al.* 2009), kuri leistų mokslininkams laboratorinėmis sąlygomis gauti labai reikšmingus tyrimų duomenis, ir žinoma, eksperimentuoti keičiant kelio viršutinės konstrukcijos parametrus. Tokios galimybės svarbios dėl poreikio išsamiau išanalizuoti skirtingas kelio viršutinės konstrukcijas, esant įvairioms aplinkos sąlygoms ir naudojant skirtingas medžiagas, kadangi eksperimentuoti eksploatuojamame kelyje yra pernelyg brangu.

Šiuolaikiškoje laboratorijoje gaunami duomenys leistų patikrinti bei plėtoti diskrečiųjų elementų modeliavimo metodais anksčiau atliktas geležinkelio balasto analizes (Lim 2004; Lu 2008, Tutumluer *et al.* 2013, Huang *et al.* 2014; Chen *et al.* 2013, Yan *et al.* 2014), kuriose yra gilinamasi į balasto fizines ir mechanines savybes. Šiose analizėse aprašyti metodai leidžia aiškiau suprasti balasto dalelių elgseną esant ciklinėms apkrovoms.

Balasto ilgalaikiškumas. Kanados Ramiojo vandenyno pakrantės geležinkeliai (KRVPG) (Klassen *et al.* 1987) balasto atrankai pasirinko išskirtinį būdą. Pirmiausia buvo atliekama petrografinė analizė netinkamoms uolienoms atrinkti. Atrinktos galimai tinkamos uolienos reitinguojamos pagal poros mechaninių savybių rezultatų kombinaciją: tai Los Andželo rodiklis (nustatomas dalelių atsparumas trupinimui) ir MA rodiklis (*ang. Mill Abrasion*), kuriuo nustatomas dalelių atsparumas tarpusavio trinčiams. Šių savybių rezultatų kombinacija (kompleksinis dėvėjimosi rodiklis) susietas su balasto ilgalaikiškumu, išreiškiamu bendra keliu pravežta mase (tonomis).

Pagrįsdami užteršto balasto analizėmis jų infrastruktūroje, KRVPG priima, kad pagrindinė balasto degradaciją sukelianti priežastis yra eismo apkrovos. Sankasos sluoksnio gruntų skverbimasis į balasto konstrukciją yra apribotas teisingai įrengto pobalastinio sluoksnio. Daroma prielaida, kad granulimetrinė sudėtis daro įtaką balasto ilgalaikiškumui daugiausiai dėl:

- tuštymių bendrojo tūrio (vienodo dydžio dalelių balastas gali talpinti tuštymėse didesnę kiekį smulkiųjų (atskilusių) dalelių, nei balastas sudarytas iš mišraus dydžio dalelių);
- stambių dalelių balastas mažiau riboja degradacijos proceso metu atsiradusių smulkesniųjų dalelių judėjimą žemyn (Klassen *et al.* 1987).

Tai reiškia, kad stambus ir vienodo dydžio dalelių balastas laikomas geresniu, nei smulkesnių vienodo dydžio dalelių balastas.

Kai kurie duomenys rodo, kad dalelių kontakto plotas balasto dėvėjimąsi veikia labiau nei kontakto jėga (Raymond 1977). Tačiau kiti duomenys rodo, kad dalelių trupėjimas ir dilimas priklauso nuo kontakto jėgos (Feng 1984). Todėl tokiu atveju, kai balasto degradacija dėl eismo apkrovų laikoma pagrindiniu balasto taršos šaltiniu, balasto granulometrijos įtaka turi būti nustatyta papildomais tyrimais.

Šiaurės Amerikos geležinkelių operatorių atsiliepimai (Johnson 1985) rodo, kad balasto degradacija dėl šaldymo/šildymo ciklų mažai prisideda prie balasto taršos. Pastarojo tyrimo metu nebuvo nustatyta kitų šaltinių įtaka balasto taršai, tačiau didelė dalis geležinkelių operatorių nurodo, kad dėl didelių dinaminių apkrovų visų rūšių balaste sparčiai formuojasi klampios masės tarša po pabėgiais (Yang *et al.* 2016).

Amerikos geležinkelių asociacija kartu su Santa Fe geležinkelių operatoriumi atliko studiją, kurios metu tyrė balasto stabilumą eksploatacijos metu (Chrismer *et al.* 1991). Buvo išbandomos trys skirtingos balasto medžiagos: dolomitas, šlakas ir kvarcitas. Po balasto sluoksnio įrengimo bandiniai buvo imami 7 metus kasmet, o per tą laiką eismo apkrovų suma pasiekė 300 milijonų bruto tonų. Užterštumo lygis buvo išreikštas dalelių, mažesnių nei 4,75 mm, masės procentine dalimi.

Po 7-ųjų metų šis užterštumo rodiklis siekė 5–7 % visų trijų rūšių balastams, taigi nė vienas iš jų nebuvo arti eksploatacijos laiko pabaigos. Įvertinus tai, kad nuo 1 % iki 3 % teršiančiosios medžiagos balaste buvo nuo pat jo įrengimo, balasto užsiteršimas kasmet padidėdavo vidutiniškai po 0,4–0,6 % per metus. Po šešių eksploatacijos metų atlikta bandinių petrografinė analizė parodė, kad 75–90 % teršiančiosios medžiagos atsirado dėl balasto dalelių degradacijos, o likusioji – iš išorinių šaltinių. Linijiniu būdu ekstrapoliuojant degradacijos lygį nuo šių 7-ųjų metų iki visiško užteršimo būsenos gaunamos nepagrįstai didelės ilgalaikiškumo reikšmės. Tai rodo, kad degradacija balasto eksploatacijos metu nėra linijinė.

1.3. Balasto savybių vertinimo ir leistinųjų verčių normavimo pasaulinė praktika

Užtikrinti tinkamą geležinkelio kelio priežiūrą ir remontą dažnai būna sudėtinga dėl lėšų trūkumo. Dėl to prastėja vežimų kokybė (transportavimo laiko kaštai, atvykimo laiku patikimumas, leistina ašies apkrova) ir didėja bėgių kelio priežiūros darbų sąnaudos, reikalingos bėgių kelio kokybę išlaikyti tam tikrame lygyje. Leidžiama apkrova į ašį, leistinieji greičiai keleiviniams ir kroviniams traukiniams, priežiūros, reikalingos kelio eksploatacijos metu, poreikis – tai bėgių kelio projektavimo normoms ir standartams labiausiai darantys įtaką veiksniai (Zhang *et al.* 2000; Eickhoff *et al.* 2015).

Čia būtina paminėti tai, kad šiuo metu skaičiavimams naudojamos leistinųjų įtempių atskiruose konstrukcijų elementuose reikšmės buvo nustatytos pakankamai seniai, jos ilgai netikrintos ir netikslintos, o tai padaryti labai svarbu daugiausiai dėl ekonominių priežasčių – tyrimais nustatyti didesni leistinieji įtempiai suteiktų galimybę didinti pervežamų krovinių kiekius. Kita vertus, dėl padidėjusių apkrovų kelio viršutinės konstrukcijos degradacijos procesas spartėtų, nors konstrukciniai parametrai būtų pakankami saugiam eismui užtikrinti. Vis dėlto, krovinių pervežimo apimtys tik didės, todėl būtina kuo tiksliau prognozuoti kelio degradacijos procesus ir planuoti savalaikius priežiūros darbus.

Geležinkelio balasto skalda turi tenkinti visus reikalavimus jos fizinėms ir mechaninėms savybėms. Šios savybės nustatomos standartizuotais laboratoriniais bandymais, o jų vertės turi atitikti norminiuose dokumentuose nurodomas leistinąsias vertes. Jei reikalavimai medžiagos savybėms netenkinami, tuomet medžiaga vertinama kaip netinkama geležinkelio balastui įrengti.

Lietuvoje taikomas Europos standartas EN 13450:2013 „Geležinkelio balasto mineralinės medžiagos“ reglamentuoja tiesiamam geležinkeliui naudojamų mineralinių medžiagų, gaunamų perdirbant gamtines arba dirbtines, arba antrines skaldytas palaidas mineralines medžiagas, savybes. Šiame standarte mineralinė medžiaga yra vadinama geležinkelio balastu. Standartas numato produktų atitiktis šiam Europos standartui vertinimą. Šio Europos standarto reikalavimai pagrįsti įvairių mineralinės medžiagos rūšių žinoma naudojimo patirtimi.

Gamtinis geležinkelio balastas turi būti gaminamas nesumaišant skirtingų geologinių šaltinių medžiagos. Geležinkelio balaste neturi būti kitokių komponentų ar medžiagų, negu nurodyta standarte LST EN 13450:2013. Gamintojas turi atlikti pradinį tipo bandymus ir gamybos kontrolę, siekiant užtikrinti, kad produktas atitinka šį Europos standartą ir atitinkamas deklaruojamas vertes.

Standarte LST EN 13450:2013 pateikiamos nustatomų rodiklių klasifikacijos, ir jų nustatymo eigos. Nei viename anksčiau minėtame norminiame dokumente nenurodomi ribiniai parametrų dydžiai. Pastarieji dydžiai (ribiniai leistinieji) paprastai nurodomi projektavimo normose ir/ar įmonių standartuose.

Lietuvoje geležinkelio linijos suskirstytos į klases pagal metinį eismo apkrovų intensyvumą (toliau MEAI) (1.1 lentelė). MEAI Lietuvoje paprastai skaičiuojamas milijonais tonų bruto viename kilometre per metus [*mln. t bruto/km per metus*]. Iš esmės tai reiškia, kad ssumuojamos visos apkrovos į kelio konstrukciją per metus, įvertinant visą traukinio svorį (bruto). Paprastai kitose šalyse naudojama išraiška: milijonai tonų bruto per metus (angl. *Milion Gross Tonnes per year*). Ji žymima: *MGT/y*. Toks traukinių eismo intensyvumo matavimo vieneto žymėjimas priimamas tolesniam naudojimui šiame darbe.

1.2 lentelėje pateikiamas geležinkelio kelių klasifikavimas Lietuvoje pagal maksimalius leistinus greičius. Šis klasifikavimas nesusietas su geležinkelio linijų klasifikavimu, kuris pateiktas 1.1 lentelėje, kadangi klasifikuojami skirtingi. Pažymėtina, kad greitis lemia traukinio sukeltų dinaminių poveikių konstrukcijai pokytį, tačiau kelio konstrukcijos degradaciją labiausiai veikia apkrovų kiekis, todėl svarbesniu laikytinas geležinkelio linijų klasifikavimas pagal metinius eismo apkrovų intensyvumus.

1.1 lentelė. Geležinkelio linijų klasifikavimas Lietuvoje (IST 1005384–2:2011)

Table 1.1. Classification of railway lines in Lithuania (IST 1005384–2:2011)

Geležinkelio linijos kategorija	Geležinkelio linijos paskirtis	Metinis eismo apkrovų intensyvumas, MGT/y
Greitkelių	Geležinkelių magistralinės linijos skirtos keleiviniams traukiniams važiuoti greičiais nuo 160 km/val. iki 200 km/val.	-
Intensyvaus eismo	Gelež. magistralinės linijos skirtos dideliam krovinių gausiui vežti	> 50
I	Geležinkelių magistralinės linijos	30 – 50
II		15 – 30
III		8 – 15
IV	Geležinkelių linijos, skirtos ne dideliam krovinių gausiui vežti	< 8
V	Privažiuojamieji keliai, vietinės ir jungiančiosios linijos	-

1.2 lentelė. Geležinkelio kelių klasifikavimas Lietuvoje pagal maksimalius leistinus greičius (ADV/001)

Table 1.2. Classification of railway lines in Lithuania according to the maximum permissible speeds (ADV/001)

Kelio kategorija		I	II	III	IV	V	VI
Didžiausias greitis, km/h	keleivinių traukinių	140	120	100	80	50	25
	prekinių traukinių	90	80	80	70	40	25

Balasto sluoksnio konstrukcijos geometrinių parametrų (kintančiųjų) parinkimas priklausomai nuo metinio eismo apkrovų intensyvumo atliekamas kaip nurodyta 1.3 lentelėje. Tačiau dokumentuose nėra rašoma apie balasto mechaninių ar geometrinių charakteristikų ribines reikšmes, priimtinas tam tikram metiniam eismo apkrovų intensyvumui (ar geležinkelio linijos kategorijai).

Be to, Lietuvoje prigijusi labai ydinga praktika norminį dokumentą LST EN 13450:2003 „Geležinkelio balasto mineralinės medžiagos“ nurodyti kaip pagrindinį balastą reglamentuojantį dokumentą. Ši tendencija pastebima daugumoje nagrinėtų geležinkelio kelių projektų, studijų, studentų darbų bei kitų dokumentų, kuriuose nors kiek kalbama apie skaldos balastą. Be to, nenurodomas ir naujesnis šio standarto leidimas LST EN 13450:2013, kuriame pateikti žymūs pakeitimai, ypač granulometrijos klasifikavime.

1.3 lentelė. Balasto konstrukcijos parinkimas pagal metinį eismo apkrovų intensyvumą ir pabėgių tipą (IST 1005384–2:2011)

Table 1.3. Ballast design selection according to intensity of the annual traffic loads and type of sleepers (IST 1005384–2:2011)

Metinis eismo apkrovų intensyvumas, MGT/y	Pabėgiai	Skaldos balasto sluoksnio po pabėgiu storis, mm	Balasto prizmės peties plotis, mm
≥ 50	Mediniai	35	45
	Gelžbetoniniai	40	
25–50	Mediniai	30	35
	Gelžbetoniniai	35	
≤ 25	Mediniai	25	25
	Gelžbetoniniai	30	

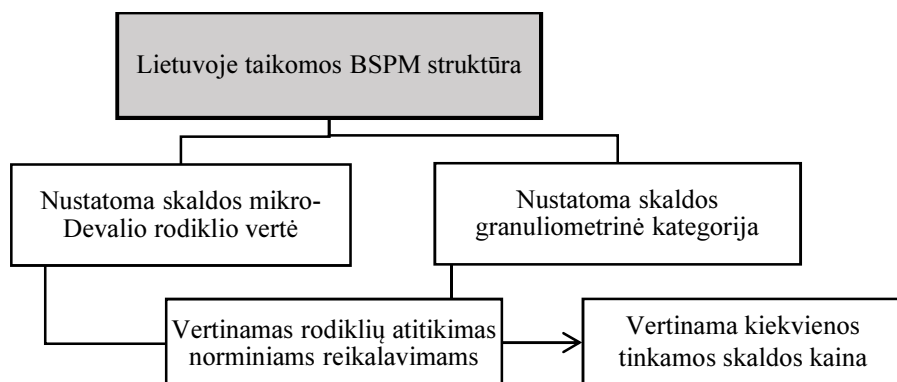
Blogiausia yra tai, kad projektų ir kitų dokumentų autoriai standartą LST EN 13450:2003 ir naujesnę jo versiją nurodo kaip norminius dokumentus, kuriuose tariamai pateikiami reikalavimai balasto medžiagos fizinėms ir mechaninėms savybėms. Deja, šio standarto paskirtis – normuoti balasto mineralinių medžiagų savybių nustatymo procedūras ir klasifikuoti bandymais nustatomus rodiklius. Šiame dokumente nepateikiami jokie skaičiais išreikšti reikalavimai balasto medžiagai, todėl įprastai projektuose lieka nenurodyta, kokią medžiagą naudoti balastui įrengti.

Tačiau ir kituose dokumentuose (standartuose, taisyklėse) nurodoma labai mažai reikalavimų. Štai AB „Lietuvos geležinkeliai“ įmonės standarte (IST 1005384-2) nurodoma, kad „Gelžbetoniniai pabėgiai klojami ant F klasės standumo nuo 31,5 mm iki 63 mm granuliometrinės sudėties, $M_{DE}RB15$ didžiausio atsparumo dėvėjimuisi verčių klasės skaldos pagal LST EN 13450:2003. Geležinkelio balasto atsparumas trupinimui ir smūgiams nustatomas pagal LST EN 13450:2003.“ Analogiškai nurodoma dokumentuose 255/K ir 256/K. Todėl galima teigti, kad Lietuvoje normuojamas tik atsparumas dėvėjimuisi pagal mikro-Devalio bandymą, kurio maksimali leistina 15 % riba yra gana stiprus apribojimas, o jis dar labiau ribojamas įmonėje AB „Lietuvos geležinkeliai“. Be to, mikro-Devalio ribinė reikšmė normuojama tik Lietuvos ir Rusijos Federacijos norminiuose dokumentuose, kitų nagrinėtų šalių norminiuose dokumentuose šios charakteristikos dydis neribojamas.

Balasto granuliometrinės klasės parinkimas nepagrįstai suvaržytas nurodant, kad leidžiama naudoti tik skaldą atitinkančią F klasę pagal LST EN 13450:2003 (G_c RB C pagal EN13450:2013).

Taip pat pastebėti prieštaringi reikalavimai. Dokumente K/111 „Geležinkelio kelio priežiūros taisyklės“ punkte 5.4.1 rašoma: „Balasto sluoksniui sudaryti gali būti naudojamos tokios medžiagos: skalda, rūšiutas žvyras, karjerinis žvyras, smėlis. Visos balastui naudojamos medžiagos turi atitikti standartus (žr. [29] ir [30])“. Čia nurodomi standartai „[29]“ – GOST 7392-85. „Akmens skalda geležinkelio kelio balastui. Techninės sąlygos“ ir „[30]“ – GOST 7394-85. „Žvyro ir žvyro su smėliu geležinkelio kelio balastas. Techninės sąlygos“ pateikia Rusijos Federacijoje balasto medžiagai priimtas normas.

Pagal Lietuvoje taikomus dokumentus ir taikomą praktiką balasto skaldos parinkimo metodika (BSPM) labai nesudėtinga (1.12 pav.). Norminiuose dokumentuose pateikiami tik du esminiai reikalavimai balasto skaldai. Tačiau taikant šią metodiką neužtikrinamas tinkamiausios skaldos parinkimas, nes neįvertinamos kitos labai svarbios fizinės ir mechaninės medžiagos savybės.



1.12 pav. Lietuvoje taikomos Balasto skaldos parinkimo metodikos struktūra
Fig. 1.12. Structure of Ballast Crushed Stone Selection Methodology applied in Lithuania

Kita problema – leistinos savybių rodiklių reikšmės nenurodytos norminiuose dokumentuose, todėl būtina nagrinėti įvairių valstybių norminius dokumentus, ir išanalizuoti šių norminių dydžių taikymo Lietuvoje galimybes. 1.4 lentelėje pateikiamas sąrašas nagrinėjamų valstybių bei dokumentų (šaltinių), kuriuose pateikiama informacija apie taikomas balasto savybių normas.

1.4 lentelė. Balasto savybių norminius dydžius nurodantys dokumentai
Table 1.4. The documents specifying normative values of the ballast aggregate characteristics

Valstybė:	Taikomi dokumentai/informacijos šaltiniai:
Lietuva	IST 1005384-2:2011; 255/K; 256/K
Rusija	GOST 7392-2002; SNip 32-01-95; GOST 8267-93
Suomija	(Kuula-Väisänen and Kaivola 2002)
Ispanija	ORDEN FOM/1269/2006
Vokietija	DBS 918 061; Richtlinienfamilie 820
Austrija	(Kuttelwascher and Zuzic 2012)
Šiaurės Amerika	AREMA (Manual for Railway Engineering)
Australija	ETA-04-01; AS 2758.7-2009

1.5 lentelėje pateikiama reikalavimų suvestinė pagal Lietuvoje galiojančias taisykles, pagal AB „Lietuvos geležinkeliai“, Rusijos GOST 7392-2002 (į kuri nurodoma dokumente K/111), bei pagal kitose valstybėse taikomus norminius dokumentus.

Pažymėtina, kad Lietuvoje galiojančiuose norminiuose dokumentuose nenumatytos galimybės balastui naudoti prastesnės mechaninės savybės mineralines medžiagas, o tai neleidžia pigiau įrengti balasto sluoksnį mažai naudojamuose nedidelio eismo intensyvumo keliuose (pavyzdžiui, privažiuojamuosiuose stočių keliuose ar nuovązose į įmonių pakrovos kelius).

1.5 lentelė. Balasto savybių leistinos vertės Lietuvoje ir kitose šalyse

Table 1.5. Limiting values of ballast aggregate characteristics in Lithuania and abroad

Eil. Nr.	Valstybė Charakteristika	Lietuva (p ¹)	Lietuva (p ²)	Rusija (p ³)
1	Granulometrijos kategorija ir/arba frakcija, mm	G _C RB C 31,5/63	G _C RB C 31,5/63	25/60
2	Smulkiosios dalelės G _F RB, %	-	≤0,6	-
3	Mineralinės dulkės f _{RB} , %	-	-	-
4	Plokštumo rodiklis FI _{RB} , %	-	≤20	-
5	Formos rodiklis SI _{RB} , %	-	-	-
6	Dalelių ilgio rodiklis L _{RB} , %	-	≤6,0	-
7	Atsparumas šaldymui ir šildymui F _{RB} , %	-	≤30	≤5,0
8	Tankis ρ _{cm} , kg/m ³	-	≥2600	-
9	Įmirkis W _{cm} , %	-	≤0,5	-
10	Atsparumo trupinimui vertinimas Los Angeles metodu LA _{RB} , %	-	≤16	-
11	Atsparumo smūgiams vertinimas Impact metodu SZ _{RB} , %	-	≤22	≤25
12	Atsparumo nusidėvėjimui vertinimas mikro-Devalio metodu M _{DE} RB, %	≤15	≤11	≤25
13	Vėžės plotis, mm	1520	1520	1520

1.5 lentelės pabaiga

	Suomija	Ispanija	Vokietija	Austrija	Šiaurės Amerika	Australija
1	G _C RB C 31,5/63 (p ⁴)	G _C RB A 31,5/63	G _C RB B 31,5/63	31,5/63	19/50	19/63
2	-	≤1,0	≤1,0	-	-	-
3	-	≤0,7	≤1,0	≤1,0	≤1,0 (p ⁸)	≤1,0 (p ⁸)
4	≤20	-	≤35	-	-	-
5	-	≤10	5–30	5–30	≤5,0	(p ⁹)
6	≤12	≤4,0	≤6,0	≤6,0	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	-	≥2500	-	-	≥2600 (p ¹⁰) ≥2650 (p ¹¹)	≥2500
9	-	≤0,5 (≤1,5 (p ⁵))	-	-	≤1,0 (p ¹⁰) ≤2,0 (p ¹¹)	≤1,0
10	≤20	≤16 (≤14 (p ⁶))	≤14 (≤12 (p ⁷))	≤22	(p ⁹)	(p ⁹)
11	-	-	≤18 (≤14 (p ⁷))	≤22	(p ⁹)	(p ⁹)
12	-	-	-	-	-	-
13	1524	1435/1668	1435	1435	1435	1435/1067 /1600

1.5 lentelėje pateiktos pastabos:

- (p¹) – duomenys iš IST 1005384-2:2011, 255K ir 256K.
- (p²) – AB „Lietuvos geležinkeliai“ rekomendacijos.
- (p³) – duomenys iš GOST 7392-2002 ir K/111.
- (p⁴) – žemesnės klasės keliams naudojama A ir B granulometrinės klasės skalda pagal EN 13450:2013.
- (p⁵) – taikoma tuomet, kai papildomai atliekamas skaldos šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams vertinimas magnio sulfato metodu pagal LST EN 1367-2:2010.

- (p^6) – taikoma geležinkelio linijose, kuriose projektinis traukinių greitis ≥ 200 km/val.
- (p^7) – taikoma geležinkelio linijose, kuriose projektinis traukinių greitis > 230 km/val.
- (p^8) – nustatomas mikrodalelių kiekis liekantis ant sieto, kurio akučių diametras 0,075 mm.
- (p^9) – charakteristikos nustatymo metodika skiriasi nuo reglamentuojamos EN 13450:2013 standarte.
- (p^{10}) – taikoma granito skaldai.
- (p^{11}) – taikoma dolomito skaldai.

Ispanijoje normuojama vienintelė mechaninė balasto charakteristika – Los Andželo koeficientas. 1.6 lentelėje pateikiama informacija, nuo ko priklauso leistinos reikšmės Los Andželo koeficientui. Pagal šią lentelę esant vėžės pločiui ≥ 1435 mm, o greičiui iki 200 km/val., balasto medžiagai Los Andželo koeficientas gali siekti ne daugiau 16 %.

Galima teigti, kad analogiškai priimta ir Lietuvoje, nors dar nepasiekiami greičiai didesni nei 160 km/h. Tačiau išskirtiniais atvejais, kai linijos eismo intensyvumas yra mažas, Ispanijoje leidžiama balastui naudoti prastesnės mechaninės savybės mineralines medžiagas (linijose, kurių vėžės plotis mažesnis nei 1435 mm, leidžiamas $LA_{RB} \leq 20$ %).

1.6 lentelė. Reikalavimų balasto medžiagos mechaninėms savybėms Ispanijoje suvestinė

Table 1.6. Summary of the requirements for the ballast material mechanical properties in Spain

Vėžės plotis, mm	Leidžiamas greitis, km/val.	Los Andželo rodiklis LA_{RB} , %
≥ 1435	≥ 200	≤ 14
≥ 1435	< 200	≤ 16
< 1435	-	≤ 20

Australijoje balasto mechaninių savybių nustatymo metodika labai skiriasi nuo priimtųjų ES valstybėse bei Rusijoje. Kaip įprasta ir kitose šalyse, Australijoje geležinkelio ruožo konstrukcija parenkama atsižvelgiant į geležinkelio linijos kategoriją. Tačiau šiuo atveju linijos kategorija lemia ir balastui tinkamos medžiagos parinkimą. Šios šalies standartuose nurodomas geležinkelio linijų klasifikavimas pagal jų metinį eismo intensyvumą milijonais tonų bruto per metus (toliau – MGT/y):

Kategorija H – eismo apkrovų intensyvumas >6 MGT/y;

Kategorija N – eismo apkrovų intensyvumas 1–6 MGT/y;

Kategorija L – eismo apkrovų intensyvumas <1 MGT/y.

1.7 lentelėje pateikiama reikalavimų balasto medžiagos mechaninėms savybėms Australijoje suvestinė, kurioje matyti, kad linijose, kuriose MEAI nuo 1 iki 6 MGT/y, leidžiama naudoti medžiagas, kurių Los Andželo rodikliai $LA_{RB} \leq 30$ %. Be to, yra žinoma, kad Australijoje geležinkelio kelio vėžės plotis yra 1435 mm pločio, ir apkrovos leidžiamos iki 30 tonų į ašį. Tai parodo, jog ir Lietuvoje gali būti taikomos lankstesnės normos, kurios suteiktų galimybę geležinkelių linijose, skirtose ne dideliam krovinių gausiui vežti, privažiuojamuosiuose keliuose bei vietinėse ir jungiančiosiose linijose naudoti prastesnių mechaninių savybių medžiagas balasto sluoksniui įrengti.

Suomijoje, kaip ir Australijoje, balastui tinkamos medžiagos parinkimą lemia metinis eismo apkrovų intensyvumas. 1.8 lentelėje „Reikalavimų balasto medžiagos mechaninėms savybėms Suomijoje suvestinė“ matyti, kad Suomijoje leidžiamos Los Andželo leistinos reikšmės (kaip ir visoje ES) yra daugiau nei 2 kartus mažesnės lyginant jas su Australijoje leidžiamomis. Tačiau Australijoje ir Europos Sąjungos šalyse skiriasi Los Andželo rodiklio nustatymo metodikos. Pirmiausia, pagal EN 1097–2:2010 būgnas su bandiniu sukamas 1000 kartų (Australijoje 500 kartų). Antra, ne vienodos imamų bandinių frakcijos: Australijoje bei JAV ir Kanadoje (pastarosiose dvejose taikomi AREMA standartai) – 19/28,5 mm, o Europos Sąjungos šalyse bei Rusijos Federacijoje – 31,5/50 mm.

1.7 lentelė. Reikalavimų balasto medžiagos mechaninėms savybėms Australijoje suvestinė

Table 1.7. Summary of the requirements for the ballast material mechanical properties in Australia

Geležinkelio linijos kategorija	MEAI, MGT/y	Mechaninės charakteristikos		
		Suirimas veikiant statinei apkrovai, %	Devalio rodiklio, %	Los Andželo rodiklis LA_{RB} , %
Kategorija H	≥ 6	≤ 25	≤ 6	≤ 25
Kategorija N	1–6	≤ 30	≤ 8	≤ 30
Kategorija L	≤ 1	≤ 40	≤ 12	≤ 40

1.8 lentelė. Reikalavimų balasto medžiagos mechaninėms savybėms Suomijoje suvestinė

Table 1.8. Summary of the requirements for the ballast material mechanical properties in Finland

Geležinkelio linijos kategorija	MEAI, MGT/y	Mechaninės charakteristikos	
		„Nordic Ball Mill“ rodiklis, %	Los Andželo rodiklis LA_{RB} , %
R1/R2	≥ 9	≤ 14	≤ 12
R3	3 – 9	≤ 14	≤ 16
R4	≤ 3	≤ 14	≤ 20

„Nordic Ball Mill“ rodiklis įprastai naudojamas nustatyti mineralinės skaldos atsparumą dėvėjimuisi nuo dygliuotų padangų eksploatacijos. Bandyams naudojamos dalelės nuo 11,2 mm iki 16 mm. Balasto vertinimas šiuo rodikliu yra mažiau prasmingas nei naudojant mikro-Devalio rodiklį.

1.4. Balasto Lietuvos geležinkelių linijose apžvalga

1.4.1. Balasto būklė

Dėl balasto reikšmingumo kelio kokybei ir stiprumui ypatingai svarbu analizuoti esamą situaciją, apžvelgti ir nustatyti problemas. Tai pirmas žingsnis link racionalaus tolimesnių visapusių balasto prizmės konstrukcijai naudojamų mineralinių medžiagų savybių tyrimų planavimo.

Pastaruoju metu tiesiant naujus ir rekonstruojant esamus geležinkelio kelius granitinė skalda yra naudojama kaip pagrindinė medžiaga balastui įrengti. Be to, visi pagrindiniai Lietuvos geležinkelio magistraliniai koridoriai yra nutiesti ant skaldos balasto.

Dažniausiai balasto prizmės konstrukcija nėra nagrinėjama globaliai, todėl siekiant optimalaus rezultato būtina įvertinti taikomas priežiūros darbų technologijas, eksploatacines apkrovas, kokybės ir saugumo lygį, ilgalaikiškumą ir, žinoma, įrengimo kainą. Dėl to pirmiausia buvo atlikta Lietuvos geležinkelio linijų balasto sluoksnio analizė, kuri parodo esamą situaciją ir egzistuojančias problemas.

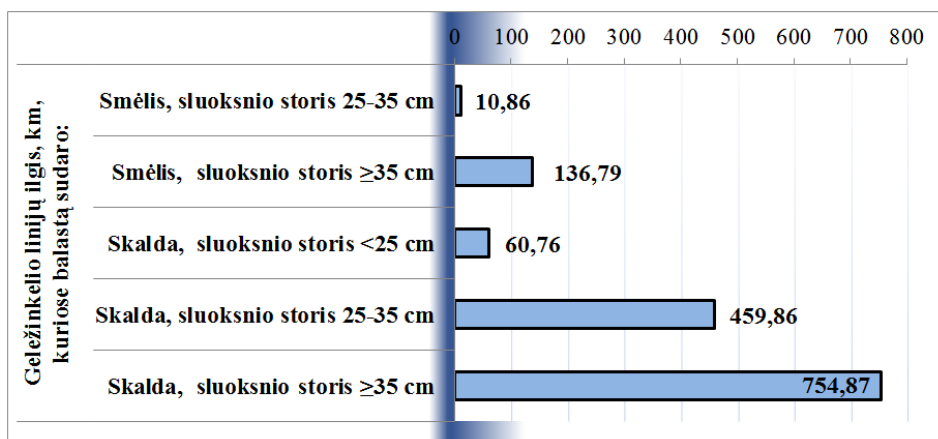
Lietuvos geležinkelių eksploatacinis ilgis siekia 1767,6 km, iš kurių beveik 22 % sudaro dvikeliai ir daugiakeliai kelio ruožai. Surinkti išsamius duomenis apie visų kelių būklę labai sudėtinga ir brangu, todėl esamos situacijos analizei

buvo parinkti pagrindiniai keliai, kuriuose didžiausias traukinių eismas ir aktualiausias kelių priežiūros organizavimo klausimas. Pagal kelių techninius pasus buvo nustatyti balastui įrengti panaudotų medžiagų kiekiai ir užterštumas. Užterštumas Lietuvoje matuojamas teršalų kiekiu (procentais) nuo bendros balasto prizmės masės.

Bendras geležinkelio kelių ilgis, kuriuose buvo išanalizuota viršutinė kelio konstrukcija – 1514,315 km. 86 % analizuotų kelių įrengti balastui panaudojant skaldą, likę 14 % kelių įrengti panaudojant balastui smėlį. 1.13 paveiksle pateiktoje diagramoje nurodomi tikslesni statistinių tyrimų rezultatai.

Šiems keliams įrengti panaudota apie 2912 tūkst. m^3 skaldos (įskaitant rūšiuotąjį žvyrą) bei apie 353 tūkst. m^3 smėlio. 785 tūkst. m^3 (27 %) skaldos balasto ir 278 tūkst. m^3 (79 %) smėlio balasto užteršimas siekia daugiau nei 20 % lygį.

Reikia pažymėti, kad neištirtas didelis kiekis geležinkelio kelių stotyse bei iešmynuose, kur balasto tarša yra didžiausia.



1.13 pav. Geležinkelių kelių ilgių pasiskirstymo pagal balastui įrengti naudojamas medžiagas ir sluoksnių storius grafikas

Fig. 1.13. Distribution in the length of railway tracks by the type of ballast material and layer thickness

Lietuvoje didžiausia dalis geležinkelių yra nutiesta ant XIX a. supiltų žemės sankasų, o jų formavimui buvo panaudoti iš iškasų paimti bei vietiniai šalia trastos esantys gruntau.

Žemės sankasai supilti gruntau buvo tankinti pagal to meto statybos technologijas arba visiškai netankinti, o atsparumą įgijo eksploatacijos metu dėl

traukinių keliamos dinaminės apkrovos, todėl po pačiu geležinkelio keliu iš viršaus yra geriau sutankėję, o gyčiau ir sankasos pakraščiuose geležinkelio eksploatacijos metu jų tankumas nuo eksploatacijos pradžios beveik nepasikeitė.

Didžiausią poveikį Lietuvos geležinkelių žemės sankasoms turi pastovus teritorijos užmirkimas bei bloga vandens nuvedimo įrenginių būklė. Pažemėjimuose beveik ištisus metus, o ypač lietingais laikotarpiais, kaupiasi vanduo, kuris mirko sankasas ir mažina jų atsparumą. Vietomis dėl drėgmės pertekliaus šalia geležinkelio trasų vyksta užpelkėjimo procesai. Įvardintų problemų sprendinys – vandens pralaidų bei melioracijos sistemų įrengimas (ar rekonstrukcija) bei geotekstilės panaudojimas sankasos įrengimui (ar rekonstrukcijai) (Vaitkus *et al.* 2014). Tačiau šio sprendinio įgyvendinimas labai vėluoja, jo vykdymas atidedamas daugiausiai dėl finansinių priežasčių.

Dėl aukščiau išvardintų priežasčių kelio stabilumas bei viršutinės kelio konstrukcijos ilgalaikiškumas žymiai pablogėja, atsiranda papildomų priežiūros kaštų. Dėl netinkamai įrengtos žemės sankasos balasto sluoksnis yra papildomai užteršiamas, netolygiai nusėda ir praranda stabilumą.

Tikslesnius rezultatus rodo tyrimai, kuriems buvo parinkti 3 dvikeliai ruožai, pasižymintys dideliu traukinių eismo apkrovų intensyvumu. Šiuose ruožuose atlikti inžineriniai geologiniai tyrinėjimai (gręžiniai kas 400 m) leido nustatyti balasto sluoksnių storius ir užteršimo lygius.

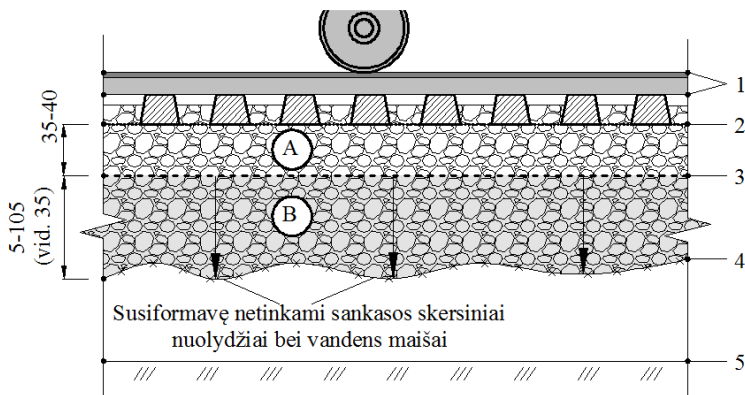
1-asis ruožas: „Mauručiai–Kazlų Rūda“, kurio ilgis 17,60 km. Jame vidutinis skaldos sluoksnio storis I ir II geležinkelio kelyje pasiskirsto 60–70 cm intervale. Taigi skaldos sluoksnis vidutiniškai yra 30–35 cm per didelis. I geležinkelio kelyje vietomis skaldos sluoksnis siekia 90–100 cm, II kelyje – 80 cm. Viršutinis skaldos sluoksnis, kurio vidutinis storis yra 43 cm, yra neužterštas, o apatinis sluoksnis, kurio vidutinis storis yra 29 cm, yra užterštas (vidutiniškai 37,5 %).

2-asis ruožas: „Jiesia–Mauručiai“, kurio ilgis 10,00 km. Jame vidutinis skaldos sluoksnio storis I ir II geležinkelio kelyje pasiskirsto 70–80 cm intervale. Taigi skaldos sluoksnis vidutiniškai yra 35–40 cm per didelis. I geležinkelio kelyje vietomis skaldos sluoksnis siekia 100–105 cm, II kelyje – 100–120 cm. Skaldos sluoksnis šiame ruože yra vientisas. Jo vidutinis užterštumas yra 20 %.

3-iasis ruožas „Baisogala – Gimbogala“, kurio ilgis 14,40 km. Jame vidutinis skaldos sluoksnio storis I ir II geležinkelio kelyje pasiskirsto 65–75 cm intervale. Taigi skaldos sluoksnis vidutiniškai yra 30–35 cm per didelis. I geležinkelio kelyje vietomis skaldos sluoksnis siekia net 140 cm, II kelyje – 100–110 cm. Viršutinis skaldos sluoksnis, kurio vidutinis storis 49 cm, yra neužterš-

tas, o apatinis sluoksnis, kurio vidutinis storis 26 cm, yra užterštas (vidutiniškai 25 %).

Pagal standartus (IST 1005384–2:2011, 2011; K/111, 2000; SNip 32-01-95, 2012), kai keleivinių traukinių važiavimo greitis iki 160 km/h, skaldos balasto prizmės aukštis, matuojamas pjūvyje po bėgiu, turi būti 35 cm. Tačiau ištirtuose ruožuose skaldos balasto sluoksnis vidutiniškai yra 30–40 cm per didelį. Vietomis skaldos sluoksnis siekia net 100–140 cm storį. Įvertinus skaldos kainą ir jos optimalų kiekį geležinkelio kelyje, tampa akivaizdu, kad ekonominiu požiūriu nagrinėtuose ruožuose skaldos storis yra neracionalus ir neefektyvus.



1.14 pav. Situacijos Lietuvos geležinkelių kelių konstrukcijose schema
Fig. 1.14. Scheme of the situation in the Lithuanian railway track structures

Čia 1 – bėgis; 2 – projektinis ir esamas skaldos balasto prizmės paviršius (po pabėgiais); 3 – projektinis žemės sankasos paviršius; 4 – esamas žemės sankasos paviršius; 5 – žemės paviršius; matmenys pateikiami centimetrais (cm).

1.14 paveiksle pavaizduota situacijos Lietuvos geležinkelių kelių konstrukcijose schema, kurioje išskirti du sluoksniai: A – viršutinis balasto sluoksnis (prižiūrimas – valomas, keičiamas) ir B – apatinis perteklinis balasto sluoksnis, susidaręs per ilgą laiką dėl blogai įrengtos sankasos (blogas sutankinimas, netinkamų gruntų naudojimas). Šis balasto sluoksnis labai užterštas mechanškai (skilusiomis dalelėmis) ir į jį patenkančiom dalelėmis: smulkiomis sankasos gruntų bei iš išorės patenkančiom dalelėmis. Sluoksnis yra blogai drenuojantis, nežinomas jo stabilumas.

1.4.2. Balastui tinkamų mineralinių medžiagų ištekliai

Skaldos balastui tinkamiausiomis medžiagomis laikomos bazalto, diabazo, granito ir dolomito uolienos, tačiau dolomitas, klintys ir kitos nuosėdinės uolienos yra gana minkštos, pasižymi daug mažesniu atsparumu gniuždymui, todėl įprastai pasirenkama kitos uolienos skalda, jei tik tam pakanka lėšų.

Dolomitas – karbonatų klasės mineralas, kurio kietumas pagal Moso skalę 3,5–4,0. Didžiausia dalis Lietuvoje kasamos dolomito skaldos naudojama kaip skalda kelių tiesimui.

Lietuvos geležinkeliuose balastui įrengti dažniausiai naudojama granito skalda. Priklausomai nuo feldšpatų ir kvarco santykio granito kietumas pagal Moso skalę skiriasi ir gali būti nuo 5,5 iki 7.

Uolienos, skirtos skaldos gamybai, dažniausiai yra išgaunamos karjeruose atviro kasimo būdu, tačiau pasitaiko atvejų, kai granitas yra išgaunamas sprogdinimo būdu. Išgaunant uolienas yra atkreipiamas ypatingas dėmesys į tai, kad gavyba vyktų iš tokių zonų, kuriose nepasitaikytų kitų uolinių priemaišų.

Lietuvos teritorijoje didžiausi kiekiai randami tokių išteklių kaip smėlis, žvyras, kalkakmenis ir dolomitas. Didžioji dalis ištirtų smėlio ir žvyro išteklių yra Vilniaus, Kauno, Utenos, Alytaus ir Tauragės rajonuose. Visi nustatyti dolomito ir kalkakmenio ištekliai yra Šiaulių ir Panevėžio (tik dolomitas) rajonuose.

Lietuvoje granitas randamas daugelyje vietų, tačiau kaip labai vertinga iškasena randama pietryčių Lietuvoje Marcinkonių granitoidų masyve, kurio plotas apie 300 km². Čia granitas slūgso 200–300 m gylyje, todėl jo gavyba kol kas nėra pradėta dėl didelių gavybos sąnaudų. Kadangi Lietuvos teritorijoje nėra eksploatuojamų granito karjerų, tai jis gabenamas iš kaimyninių šalių – Ukrainos, Baltarusijos, Skandinavijos šalių. Skaldos kokybė Rovinskajės, Žitomirskajės srityse (Ukraina) yra labai aukšta, kadangi ji išgaunama iš granito branduolio centro. Baltarusija yra to branduolio kraštas, todėl čia skaldos kokybė yra šiek tiek prastesnė (S. Skrinskas *et al.* 2010). Informacija apie karjerus, kuriuose išgaunama Lietuvos geležinkeliuose naudojama skalda, bei įmonės, eksploatuojančias šiuos karjerus, pateikta A priede.

Tam, kad atgabenta iš užsienio šalių granitinė skalda atitiktų reikalaujamą granulimetrinės sudėties klasę, Lietuvoje ji yra sijojama. Taip pat atliekami laboratoriniai bandymai, siekiant nustatyti fizines ir mechanines savybes.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Balasto skaldos taršą labiausiai didinantis veiksnys yra balasto dalelių smulkėjimas, kuris sudaro apie 76 % balasto taršos. Reikšmingas balasto dalelių trupėjimas sukeliamas pamušant balastą – vieno ciklo metu ties vienu pabėgiu sudaroma 2–4 kg dalelių, smulkesnių nei 14 mm.

2. Defektų atsiradimas dolomito skaldoje pastebimas ties bėgių sandūromis, kur dalelės susmulkinamos iki miltelių pavidalo ir kartu su vandeniu sudaro klampią masę, dėl kurios prasideda balasto ir pabėgio erozija, atsiranda tarpas po pabėgiu. Šiuose tarpuose esanti masė dažniausiai būna sudaryta iš dalelių, kurių dydis nuo 10 mm iki molio dalelių dydžio.

3. Balasto medžiagos dalelių tvirtumo ir kietumo rodikliai tiesiogiai daro įtaką bėgių kelio (balasto prizmės) ilgalaikiškumui. Degradacija eksploatacijos metu nėra linijinė.

4. Lietuvoje galiojančiuose norminiuose dokumentuose nėra numatytos galimybės mažo eismo intensyvumo keliuose balastui naudoti skaldas, kurių mikro-Devalio rodiklio (M_{DE}) reikšmės mažesnės nei 15 %.

5. Lietuvoje taikoma balasto skaldos parinkimo metodika neįvertina visų svarbiausių skaldos fizinių ir mechaninių savybių. Todėl turi būti sudaryta nauja balasto skaldos parinkimo metodika, kurioje būtų įvertinami balasto ilgalaikiškumas ir perspektyvinės traukinių eismo apkrovos.

6. Balasto būklės Lietuvos geležinkeliuose analizė parodo, kad tyrimui parinktuose keliuose (1514 km) 27 % skaldos balasto ir 79 % smėlio balasto užteršimas siekia daugiau nei 20 % lygį. Inžineriniai geologiniai skaldos balasto sluoksnių tyrinėjimai (trijuose ruožuose) parodo, kad skaldos balasto sluoksnio storis vidutiniškai yra 30–40 cm didesnis už projektinį, jo apatinė dalis yra 30 % labiau užteršta nei viršutinė.

Atlikus literatūros analizę buvo suformuluoti pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Sudaryti geležinkelio kelio balasto skaldos fizinių ir mechaninių savybių vertinimo metodiką.

2. Laboratoriniais bandymais ištirti granito ir dolomito skaldų fizines ir mechanines savybes.

3. Sudaryti balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodiką, kurioje įvertintos jo mechaninės savybės.

4. Suklasifikuoti balasto skaldos Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklius, pateikti rekomendacijas kitų charakteristikų ribiniams dydžiams.

5. Pritaikius sudarytą balasto skaldos parinkimo metodiką, įvertinti granito ir dolomito skaldos panaudojimo geležinkelio balastui įrengti galimybes.

Balasto skaldos parinkimo metodikos sudarymas ir skaldos savybių tyrimo rezultatai

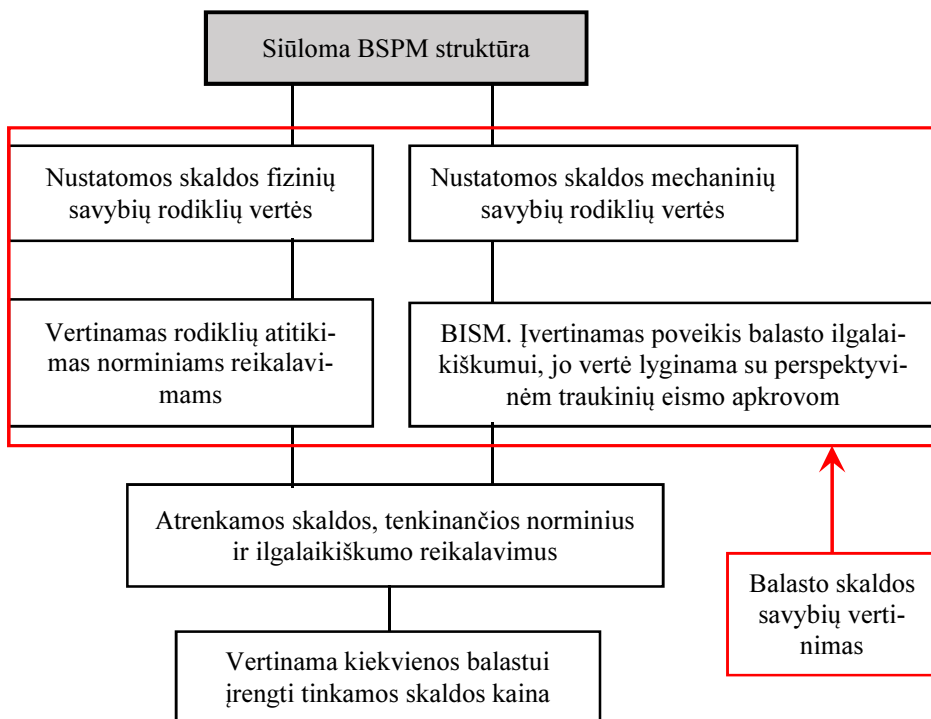
Antrajame skyriuje sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika (BSPM), įvertinanti medžiagos fizines ir mechanines savybes. Sudaryta moksliniais tyrimais pagrįsta balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika (BISM). Tyrinėjamos granito ir dolomito skaldų, naudojamų geležinkelio balastui įrengti, fizinės ir mechaninės savybės. Pateikta standartizuotų eksperimentinių bandymų programa, etapai, objektas. Pateikti skaldų fizinių ir mechaninių savybių tyrimų rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbtos trys autoriaus publikacijos nas *et al.* 2013; Ramūnas *et al.* 2014; Ramūnas *et al.* 2016).

2.1. Balasto skaldos parinkimo metodika

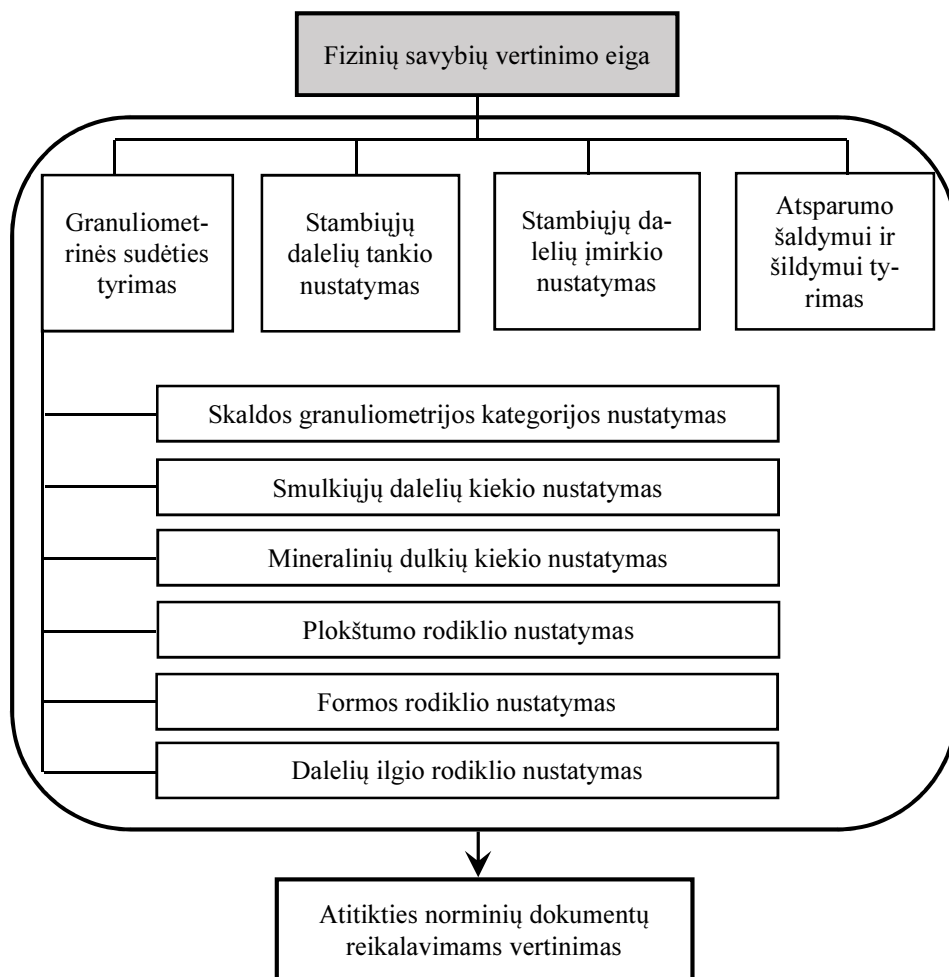
Įvertinus pirmame skyriuje aptartas Lietuvoje ir pasaulyje taikomas balasto skaldos savybių vertinimo ir tinkamiausios skaldos parinkimo praktikas, nustatyta, kad būtina sudaryti skaldos parinkimo metodiką, įvertinančią visas (ar bent

daugumą) skaldos fizinės ir mechaninės savybės bei mechaninių savybių įtaką balasto ilgalaikiškumui. Siūloma BSPM struktūra pateikiama 2.1 paveiksle.



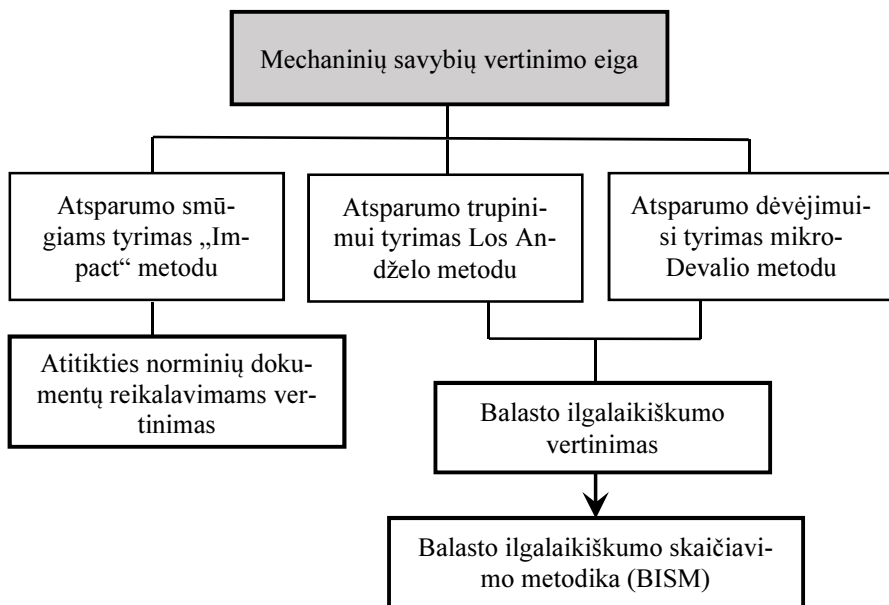
2.1 pav. Siūloma Balasto skaldos parinkimo metodikos struktūra
Fig. 2.1. The structure of proposed Ballast Crushed Stone Selection Methodology

2.1 paveiksle nurodomų fizinių ir mechaninių savybių vertės nustatomos standartizuotais laboratoriniais bandymais. Tuomet turi būti įvertinta, ar fizinės savybės atitinka normose nurodomas leistinas vertes. Kaip minėta pirmame skyriuje, iš fizinių savybių normose nurodoma tik leistina granulimetrinė kategorija, todėl šiame darbe bus pasiūlytos kitų fizinių savybių leidžiamos rodiklių reikšmės. Mechaninėms savybėms vertinti turi būti rastas jų ryšys su balasto ilgalaikiškumu. Tuomet turi būti įvertinama, kokioms perspektyvinėms apkrovoms esant skalda yra tinkama naudoti geležinkelio kelio balasto sluoksniui įrengti. Po to vertinamos atrinktų (tinkamų naudojimui) medžiagų kainos.



2.2 pav. Fizinių savybių vertinimo eiga
Fig. 2.2. The assessment process of physical properties

2.2 paveiksle pateikiama fizinių savybių vertinimo eiga. Ją sudaro dvi pagrindinės dalys: fizinių savybių nustatymas laboratorijoje, taikant standartizuotus bandymų metodus, bei atitikties norminių dokumentų reikalavimams vertinimas.



2.3 pav. Mechaninių savybių vertinimo eiga

Fig. 2.3. The assessment process of mechanical properties

2.3 paveiksle pateikiama mechaninių savybių vertinimo eiga. Joje nurodoma, kad balasto ilgalaikiškumas turi būti vertinamas pagal atsparumo trupinimui ir atsparumo dėvėjimuisi rodiklių vertes. Tam reikia sudaryti Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodiką (BISM).

2.2. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika

2.2.1. Atsparumas trupinimui ir nusidėvėjimui dėl dalelių trinties

Atsparumas trupinimui: Los Andželo bandymas. Balasto (su-)trupėjimas ir dėvėjimasis dėl trinties (sudilimas) yra pagrindinės balasto degradacijos priežastys. Jos lemia kelio nusėdimus ir didina išlaidas bėgių kelio geometrijos priežiūrai (Andrade and Texeira 2011).

Taikant Los Andželo bandymą nustatomas dalelių atsparumo trupinimui rodiklis – Los Andželo koeficientas LA. Jis skirtas įvertinti balasto dalelių stiprumą ir gebėjimą nesutrupėti po pabėgiu. Los Andželo bandymas atliekamas metaliniame būgne 10.000 kartų apsukant 10 kg skaldos balasto (frakcija

31,5/50 mm) kartu su 12 metalinių kamuolių, kurių bendra masė 5 kg. Būgnas sukamas 30–33 apsisukimų per minutę (aps/min) greičiu. Metaliniame būgne besisukančios balasto dalelės daužomos (trupinamos) metaliniais kamuoliais. Po 1000 apsisukimų medžiaga išimama iš būgno ir nuplaunama ant 1,6 mm sieto. LA koeficientas nustatomas kaip pro 1,6 mm sieto akeles pralindusių (išplautų) dalelių procentinė dalis nuo visos bandinio masės. Kuo mažesnis LA koeficientas, tuo didesnis tiriamos medžiagos atsparumas trypinimui. Los Andželo rodiklio nustatymo metodika ir įranga aprašoma B priede.

Los Andželo bandymo sąlygos tinkamai atspindi balasto degradaciją po pagėgiu, tačiau dar reikia papildomais bandymais nustatyti balasto degradaciją dėl nusidėvėjimo, sąlygojamo dalelių trinties tarpusavyje. Dalelių tarpusavio sąveika yra neišvengiamas balasto degradacijos mechanizmas.

Atsparumas dėvėjimuisi: MA, Devalio ir mikro-Devalio bandymai. Balasto konstrukcijos stabilumą atspindi MA bandymas, kuriuo nustatomas dalelių atsparumas dėvėjimuisi dėl trinties. MA bandymo koncepcija paremta mikro-Devalio (M_{DE}) bandymu (EN 1097–1). MA ir mikro-Devalio bandymai vienodai leidžia nustatyti atsparumą dėvėjimuisi be trupinimo (arba jis yra labai nežymus), o dalelių atsparumas trupinimui geriau nustatomas LA bandymais. Nustatyta, kad MA iš dalies koreliuoja ir su Devalio bandymo rezultatais (Raymond and Diyaljee 1979).

MA yra šlapių dalelių dėvėjimosi dėl trinties bandymas, atliekamas 10.000 kartų apskant porcelianiniame inde 3 kg skaldos balasto (frakcija 19/37,5 mm) ir 3 l vandens. Porceliano indas sukamas 33 aps/min greičiu. Dėl porceliano indo sukimosi balasto dalelės ritasi viena per kitą ir dėvisi išvengiant reikšmingo dalelių trupinimo, vykstančio LA bandymo metu.

Po 10.000 apsisukimų medžiaga išimama iš indo ir nuplaunama per 0,074 mm sieta. MA rodiklio nustatymas:

$$MA = \frac{3000 - m}{30}, \quad (2.1)$$

čia MA – atsparumo nusidėvėjimui dėl trinties rodiklis (ang. *Mill Abrasion*), %; m – medžiagos, likusios ant sieto (akučių diametras 0,074 mm), masė, g.

Kuo mažesnis MA rodiklis, tuo didesnis tiriamos medžiagos atsparumas dėvėjimuisi dėl trinties. MA bandymai neregamentuoti ASTM ar EN standartuose, tačiau (Selig and Boucher 1990) savo darbe detalai aptaria bandymą ir rekomenduojamas procedūras.

Kaip alternatyva šiam MA bandymui, balastas gali būti vertinamas analogiškam atsparumui dėvėjimuisi dėl trinties taikant mikro-Devalio bandymą, kuris aprašytas standarte LST EN 1097-1 „Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (Devalio metodas)“. Mikro-Devalio bandymas aprašytas ir dokumente ASTM D6928-10.

Mikro-Devalio, MA ir Devalio bandymų techninių parametrų suvestinė pateikiama 2.1 lentelėje. Šiems bandymams atlikti naudojamų aparatų nuotraukos pateikiamos atitinkamai 2.4, 2.5 ir 2.6 paveiksluose.

2.1 lentelė. Mikro-Devalio, MA ir Devalio rodiklių nustatymo bandymų techninių parametrų suvestinė

Table 2.1. Summary of technical parameters of testing the micro-Deval, MA ir Deval Abrasion values

Žymėjimas Aprašas	Bandymų techniniai parametrai		
	Mikro-Devalis, M _{DE}	MA	Devalis, DE
Bandymo indo parametrai	Metalinis būgnas; 200 mm vidinis diameteras; 400 mm ilgis.	Porceliano indas; 229 mm išorinis diameteras.	Metalinis indas, su- kamas 30° kampu; 200 mm vidinis diameteras; 340 mm ilgis.
Bandinio cha- rakteristikos (masė ir frakci- ja)	5 kg 31,5/40 mm 5 kg 40/50 mm 10 kg 31,5/50 mm	1,5 kg 19/25 mm 1,5 kg 25/37,5 mm 3 kg 19/37,5 mm	5 kg 38/51 mm
Bandymui nau- dojamas van- dens kiekis	2 l	3 l	5 l
Apsisukimų skaičius ir grei- tis	14.000 aps 100 ± 5 aps/min	10.000 aps 33 ± 1 aps/min	10.000 aps 30–33 aps/min
Bandymo truk- mė	140 min.	300 min.	300 min.
Vertinama ban- dinio dalis	Liekana ant 1,6 mm sieto	Liekana ant 0,074 mm sieto	Liekana ant 2,36 mm sieto

M_{DE} bandymas atliekamas 14.000 kartų apsuksiant metaliniame inde 10 kg skaldos balasto (frakcija 31,5/50 mm) ir 2 l vandens. Metalinis indas sukamas 100 aps/min greičiu. Metaliniam indui sukantis balasto dalelės ritasi viena per kitą ir dèvisi kaip MA bandymo metu išvengiant reikšmingo dalelių trupinimo. Po 14.000 apsisukimų medžiaga išimama iš indo ir nuplaunama per 1,6 mm sietą. M_{DE} rodiklis nustatomas kaip pro 1,6 mm sieto akeles pralindusių (išplautų) dalelių procentinė dalis nuo visos bandinio masės. Kuo mažesnis M_{DE} rodiklis, tuo didesnis tiriamos medžiagos atsparumas dėvėjimuisi dėl trinties. M_{DE} rodiklio nustatymo metodika ir įranga plačiau aprašoma B priede.



2.4 pav. Aparatas mikro-Devalio bandymui atlikti
Fig. 2.4. The aparatus for micro-Deval testing



2.5 pav. Aparatas „Mill Abrasion“ bandymui atlikti
Fig. 2.5. The aparatus for „Mill Abrasion“ testing



2.6 pav. Aparatas Devalio bandymui atlikti
Fig. 2.6. The aparatus for Deval testing

Be išimties visose specifikacijose siekiama įvertinti apkrovomis veikiamų balastą sudarančių dalelių kokybę. Idealiu atveju toks kokybės vertinimas turėtų atspindėti balastą sudarančių dalelių kietumą (ang. *hardness*) ir tvirtumą (ang. *toughness*). Įprastai pasaulyje geležinkelio balastui naudojamos žaliavos dalelėms tirti naudojami atsparumo smūgiams ir trupinimui bandymai, Los Andželo bei kiti panašūs bandymai. Tačiau šiais bandymais iš esmės nustatomas tik balasto medžiagos tvirtumas, o mineralų kietumas šių bandymų rezultatams turi labai mažai įtakos. Bet kuriai šių bandymų porai (pvz.: Los Andželo ir Atsparumo smūgiams pagal LST EN 1097-2:2010 bandymai) gaunama pakankamai stipri koreliacija (Gaskin and Raymond 1976), todėl skirtingų medžiagų tvirtumo palyginimui pakanka atlikti vieną iš šių bandymų, o praktikoje dažniausiai pasirenkamas Los Andželo (LA) bandymas. Pažymėtina, kad Europoje priimta praktika atlikti LA bandymus kartu su atsparumo smūgiams (ang. *Impact Factor*) bandymais yra perteklinė.

Kietesnės mineralinės uolienos trupa lėčiau (net ir lauko sąlygomis), nes taškuose, kur dalelės kontaktuoja tarpusavyje, sukelia mažiau smulkinimo į miltelius. Be to, atskilusios dalelės yra kampuotesnės ir stambesnės, todėl balastas užsiteršia lėčiau. Lyginant balasto medžiagas, kurių LA vertės vienodos, geresnius darbo lauko sąlygomis rezultatus rodo balastas, sudarytas iš kietesnių mineralinių dalelių (Raymond 1985). Todėl medžiagų lyginimas vertinant vien tik LA vertes (bei atsparumą smūgiams), kurios iš principo nurodo uolienos tvirtumą, neužtikrina tinkamiausios medžiagos parinkimo. Uolienas sudaro mineralai, turintys skirtingas kietumo vertes, todėl reikėjo metodo, leidžiančio įvertinti uolienos bendrą kietumą. Tai buvo pasiekta pritaikius Mill Abrasion bandymą (MA), įprastai naudojamą kalnakasybos pramonėje (McIntyre 1980). Šiuo bandymu nustatomas rodiklis, kuris parodo dalelių atsparumą dėvėjimuisi dėl trinties.

2.2.2. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika pagal Canadian Pacific Railroads

Uolienos, kuriose dominuoja kietieji mineralai, turi mažesnes MA bandymo vertes. Taip pat nustatyta, kad uolienų, sudarytų iš vienos rūšies mineralų, MA vertės nėra vienodos. To priežastimi įvardijamas skirtingas mineralų kietumas ir tankis. Visa tai dar labiau pabrėžė MA bandymo svarbą vertinant uolienos kietumą.

Šie pastebėjimai reiškia, kad tikėtiną balasto elgseną eksploatuojant kelyje galima ir reiktų vertinti derinant LA ir MA bandymų rezultatus (Raymond 1985). Kanados Ramiojo vandenyno pakrantės geležinkelių (KRVP) užsakymu buvo atlikta balasto degradacijos kelyje studija (Klassen *et al.* 1987), kurioje nustatyta, kad skirtingų balastui skirtų uolienų santykinės eksploatacinės

savybės galima reprezentuoti kompleksiniu dėvėjimosi rodikliu N_A (ang. *Abrasion Number*), kuris apibrėžiamas kaip LA vertės ir $5 MA$ verčių suma:

$$N_A = LA + 5 \times MA, \quad (2.2)$$

čia N_A – kompleksinis dėvėjimosi rodiklis, %; LA – Los Andželo rodiklis, %; MA – dalelių atsparumo tarpusavio trinčiai rodiklis (ang. *Mill Abrasion Value*), %.

Studijos (Klassen *et al.* 1987) pagrindu KRVPG įtraukė N_A į balasto specifikacijos. KRVPG specifikacijose buvo įtrauktos ir MA bandymo procedūros (Raymond and Diyaljee 1979).

KRVPG susiejo balastui naudojamos medžiagos N_A vertes su nustatytu to balasto ilgalaikiškumu „*Life*“, kuris išreiškiamas pervežta bendra mase MGT (ang. *Million Gross Tons*) iki balasto nusidėvėjimo, kuomet reikalingas jo atnaujinimas. Ilgalaikiškumas buvo nustatomas balastui, esančiam po mediniais pabėgiais (gelžbetoniniams pabėgiams ilgalaikiškumas nevertintas). Į pastarąją studiją nebuvo įtraukti geležinkelio ruožai, kuriuose balastą smarkiai paveikė aplinkos veiksniai ir/ar buvo smarkiai užteršti išorinių taršos šaltinių. Be to, modelis nevertina balasto užsiteršimo smulkiais dalelėmis dėl pabėgių pamušimo – balasto plūkimo po pabėgiu, atliekamo tarpinių remontų metu, siekiant atstatyti bėgių kelio geometriją. Tačiau gaunami rezultatai leidžia skaičiuoti balasto ilgalaikiškumą idealiomis eksploatacinėmis sąlygomis, o lyginant skirtingų balasto medžiagų ilgalaikiškumo rodiklius galima parinkti tinkamiausią skaldą tiek ekonominiu tiek ir inžineriniu požiūriais.

$$Life = 10^6 e^{8,08 - 0,0382 \times N_A}, \quad (2.3)$$

čia *Life* – balasto ilgalaikiškumas, išreiškiamas linija pervežta bendra (bruto) mase, MGT.

2.2.3. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodikos pertvarkymas

Matavimo vienetai. Skaičiuojant analizuojamu modeliu rezultatai gaunami Amerikoje plačiai naudojamu masės matavimo vienetu „Short ton“ (žymėjimas: *ton*): $1 \text{ ton} = 0,9071847 \text{ t} = 907,1847 \text{ kg}$.

Europoje priimta, kad $1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$, todėl balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo modeliui *Life* turi būti taikomas korekcijos koeficientas:

$$A_k = 1000 / 907,1847 = 1,1023.$$

Priimama, kad $A_k = 1,102$.

Ašies apkrova. KRVPK naudotas modelis pritaikytas 30 t ašinei apkrovai, o Lietuvoje taikoma 25 t maksimali ašies apkrova į bėgių kelią, todėl reikia nustatyti, korekcijos koeficientą B_k , leisiantį įvertinti leistinų ašies apkrovų skirtumą.

Yra žinoma, kad poveikis balastui yra apytiksliai lygus pusei poveikio bėgiui (Esveld 2001), o balasto degradacija tiesiogiai veikia kelio geometriją. Taip pat žinoma, kad balaste įtempimų padidėjimas 10 % sąlygoja nuo 1,2 iki 1,5 karto greitesnį kelio geometrijos kokybės mažėjimą.

Nagrinėjamas modelis pritaikytas 20 % didesnei ašinei apkrovai, nei Lietuvoje leidžiama 25 t ašinė apkrova. Balasto degradacija, kai leidžiama maksimali 25 t ašies apkrova, bus mažiausiai B_k kartų lėtesnė:

$$B_k = 1 + 0,2 \times 2 = 1,400.$$

Ilgalaikiškumo skaičiavimo modeliui koreguoti priimamas korekcijos koeficientas $B_k = 1,400$.

Pabėgių tipas. KRVPK naudotas modelis pritaikytas balasto ilgalaikiškumui skaičiuoti, kai viršutinei kelio konstrukcijai naudojami mediniai pabėgiai. Todėl reikia nustatyti, korekcijos koeficientą C_k , leisiantį įvertinti pabėgių tipo įtaką.

Naudojant gelžbetoninius pabėgius dinaminės apkrovos ir įtempiai balaste yra iki 25 % didesni nei naudojant medinius pabėgius (Selig and Waters 1994). Kadangi balaste įtempimų padidėjimas 10 % sąlygoja nuo 1,2 iki 1,5 karto greitesnį kelio geometrijos kokybės mažėjimą (Esveld 2001), tai balasto degradacija esant gelžbetoniniams pabėgiams vyks mažiausiai C kartų greičiau (nei esant mediniams pabėgiams):

$$C_k = 1 + 0,2 \times 2,5 = 1,500.$$

Ilgalaikiškumo skaičiavimo modeliui koreguoti priimamas korekcijos koeficientas atvirkščias dydžiui C :

$$C_k^{-1} = 1/1,500 = 2/3.$$

Priimama, kad $C_k^{-1} = 0,667$.

Nebuvo rasta mokslinių darbų, kuriuose būtų aprašyti tyrimai MA ir mikro-Devalio bandymais gaunamų rezultatų ryšiui nustatyti. Tačiau žinoma, kad MA bandymo koncepcija paremta mikro-Devalio (M_{DE}) bandymu (Raymond 1985; Klassen *et al.* 1987), o tos pačios kilmės uolienos MA ir M_{DE} rodikliai įprastai būna labai panašūs. Todėl daroma prielaida, kad $MA = M_{DE}$ ir tuomet kompleksinis dėvėjimosi rodiklis skaičiuojamas formule:

$$N_A = LA + 5 \times M_{DE}, \quad (2.4)$$

čia N_A – kompleksinis dėvėjimosi rodiklis, %; LA – Los Andželo rodiklis, %; M_{DE} – mikro-Devalio rodiklis, %.

Kadangi atskirai nustatomas balasto ilgalaikiškumas, kai naudojami mediniai pabėgiai ir kai naudojami gelžbetoniniai pabėgiai, tai ilgalaikiškumą simbolizuojantis „*Life*“ pakeičiamas atitinkamai simboliais L_M ir $L_{G/B}$.

Kai konstrukcijoje naudojami mediniai pabėgiai balasto ilgalaikiškumui L_M nustatyti skaičiavimo formulė (2.3) koreguojama panaudojant korekcijos koeficientus A_k ir B_k :

$$L_M = A_k \times B_k \times 10^6 e^{8,08 - 0,0382 \times N_A} = 1,102 \times 1,400 \times 10^6 e^{8,08 - 0,0382 \times N_A}. \quad (2.5)$$

(2.5) formulėje N_A išskleidus pagal (2.4) formulę, gaunama galutinė balasto ilgalaikiškumo, kai pabėgiai mediniai, skaičiavimui naudojama formulė:

$$L_M = 1,5428 \times 10^6 e^{8,08 - 0,0382 \times (L_A + 5 \times M_{DE})}. \quad (2.6)$$

Kai konstrukcijoje naudojami gelžbetoniniai pabėgiai balasto ilgalaikiškumui $L_{G/B}$ nustatyti skaičiavimo formulė (2.6) koreguojama panaudojant anksčiau priimtą korekcijos koeficientą C_k^{-1} :

$$L_{G/B} = C_k^{-1} \times L_M = 0,667 \times L_M. \quad (2.7)$$

Galutinė balasto ilgalaikiškumo, kai pabėgiai gelžbetoniniai, skaičiavimui naudojama formulė:

$$L_{G/B} = C_k^{-1} \times L_M = 1,029 \times 10^6 e^{8,08 - 0,0382 \times (L_A + 5 \times M_{DE})}. \quad (2.8)$$

Naudojantis formulėmis (2.4), (2.6) ir (2.8) galima pagal nustatytus balasto Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklius apskaičiuoti balasto ilgalaikiškumą, kuris išreiškiamas pervežta bendra mase iki balasto nusidėvėjimo, kuomet reikalingas jo atnaujinimas.

2.3. Eksperimentinių bandymų programa ir metodika

Eksperimentinių bandymų programa. Siekiant nustatyti bei įvertinti skirtingos mineralinės skaldos savybes, laboratorijoje atlikti standartizuoti eksperimentiniai bandymai. Eksperimentiniams bandymams buvo atrinktos ir laboratorijoje ištirtos 2 dolomito ir 3 granito skaldos. Kaip nurodyta tyrimų eigą reglamentuojančiuose standartuose, kiekvienai savybei nustatyti imties dydis buvo ne mažesnis nei 3 ėminiai. Dolomito skaldos užkoduotos: D1 ir D2. Granito skaldos užkoduotos: G1, G2 ir G3.

Eksperimentinių bandymų tikslas – nustatyti skaldų fizines ir mechanines savybes, įvertinti, ar šių savybių dydžiai atitinka normose nurodytas leidžiamas reikšmes. Eksperimentinių bandymų atlikimui išskirti du etapai:

Pirmojo etapo metu atrinkti bandiniai bei nustatytos geometrinės savybės. Nustatyta kiekvienos skaldos granulimetrinė sudėtis (su plovimu). Nustatyti smulkiųjų dalelių ir mineralinių dulkių kiekiai; plokštumo, dalelių formos ir dalelių ilgio rodikliai.

Antrojo etapo metu nustatytos mineralinės skaldos fizinės ir mechaninės savybės. Nustatytas mineralinės medžiagos dalelių atsparumas šildymo ir šaldymo ciklams; tankis ir įmirkis; atsparumas trupinimui, smūgiams ir dėvėjimuisi (dėl dalelių tarpusavio trinties).

Tyrimų objektas: skaldų D1, D2, G1, G2, G3 fizinių ir mechaninių savybių analizė.

Eksperimentinių bandymų metu vykdomi tyrimai ir jiems taikyta standartizuota bandymų metodika:

Fizinės savybės:

- granulimetrinė sudėtis; smulkiųjų dalelių ir mineralinių dulkių kiekiai (LST EN 933-1:2012. Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas);
- plokštumo rodiklis; dalelių ilgio rodiklis (LST EN 933-3:2012. Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 3 dalis. Dalelių formos nustatymas. Plokštumo rodiklis);
- formos rodiklis (LST EN 933-4:2008. Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 4 dalis. Dalelių formos nustatymas. Formos rodiklis);
- dalelių tankis ir įmirkis (LST EN 1097-6:2013. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas);
- atsparumas šaldymui ir atšildymui (LST EN 1367-1:2007. Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 1 dalis. Atsparumo šaldymui ir atšildymui nustatymas).

Mechaninės savybės:

- atsparumas dėvėjimuisi (LST EN 1097-1:2011. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (mikro-Devalio metodas));
- atsparumas trupinimui ir smūgiams (LST EN 1097-2:2010. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai).

2.4. Balasto skaldos eksperimentinių bandymų rezultatai

Kiekvienos savybės vidurkio vertė nustatyta iš 3 kiekvienos skaldos bandinių tai savybei tirti. Visų savybių bandymų rezultatų skaitinės reikšmės pateiktos 2.2 lentelėje. 2.3 lentelėje pateiktos skaldų nustatytų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013.

2.2 lentelė. Savybių nustatymo rezultatų suvestinė
Table 2.2. Summary of the defined properties

Charakteristika \ Skaldos kodas	D1	D2	G1	G2	G3
Granulometrijos kategorija G_{CRB}	C, D	-	D	A, B, C	-
Smulkiosios dalelės G_F , %	0,1	0,3	0	1,0	0,1
Mineralinės dulkės f , %	0,5	1,0	0,4	0,3	0,3
Plokštumo rodiklis Fl , %	3	3	10	12	10
Dalelių ilgio rodiklis L , %	3	0	5	4	8
Formos rodiklis SI , %	9	1	17	9	12
Tankis ρ_{cm} , t/m^3	2,73	2,66	2,68	2,75	2,80
Įmirkis W_{cm} , %	0,8	1,4	0,2	0,2	0,2
Atsparumo trypinimui vertinimas Los Angeles metodu LA , %	21,1	22,7	14,7	9,2	14,6
Atsparumo smūgiams vertinimas Impact metodu SZ , %	22,7	24,7	18,8	11,6	16,8
Atsparumo nusidėvėjimui vertinimas mikro-Devalio metodu M_{DE} , %	10,6	12,4	5,1	4,9	7,3
Atsparumas šaldymui ir šildymui F , %	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1

Granulimetrinės sudėties nustatymo sijoiant bendrieji ir grafiniai rezultatai pateikti C priede.

2.2 lentelėje pateikiami mechaninių savybių tyrimo rezultatai (LA_{RB} , SZ_{RB} , M_{DERB}), kurių skaitinės vertės nėra suapvalintos iki artimiausio sveikojo skaičiaus (apvalinti reikalauja šioms savybėms nustatyti skirti standartai), nes toks rezultatų pateikimas leidžia tiksliau vertinti šias savybes. Tikslesnės LA_{RB} bei M_{DERB} reikšmės reikalingos ilgalaikiškumo skaičiavimams atlikti.

2.3 lentelė. Nustatytos savybių kategorijos pagal standartą LST EN 13450:2013

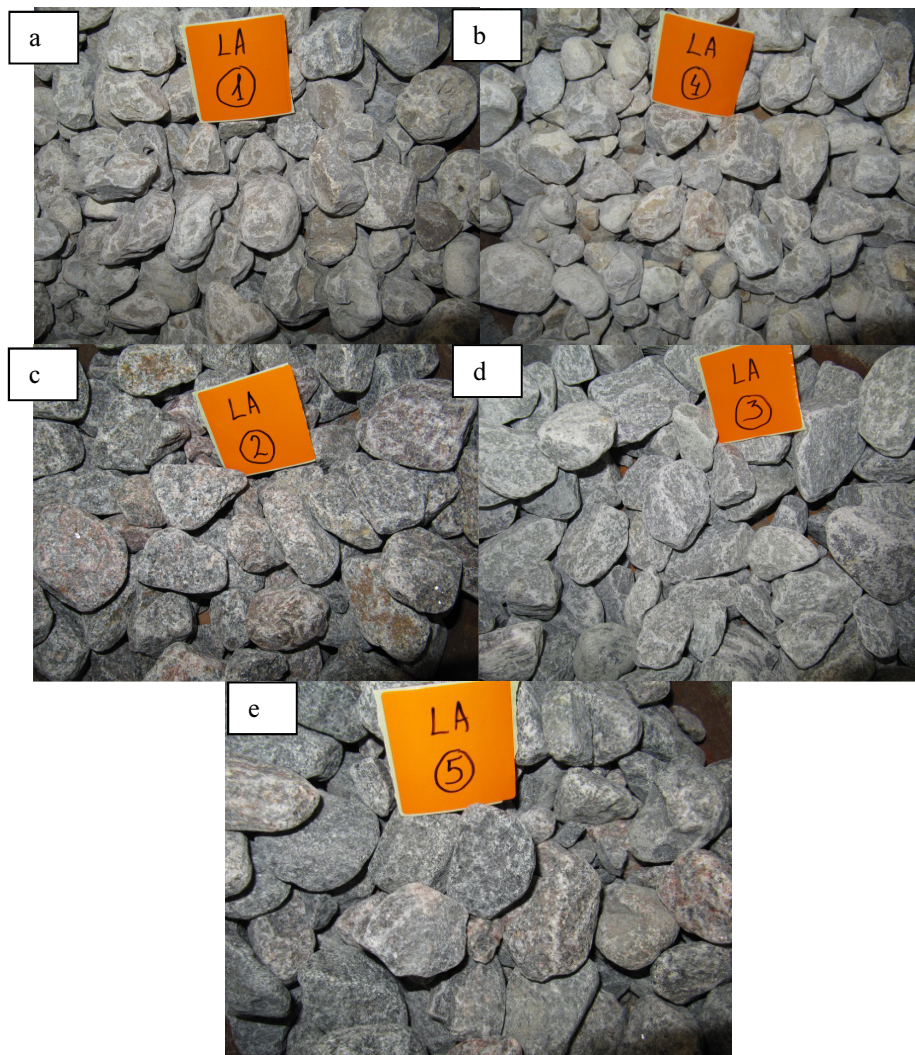
Table 2.3. Categories of the defined properties in accordance with standard LST EN 13450:2013

Skaldos kodas Charakteristika	D1	D2	G1	G2	G3
Granulometrijos kategorija G_{cRB}	C, D	-	D	A, B, C	-
Smulkiosios dalelės G_{fRB} , %	$G_{fRB} A$	$G_{fRB} A$	$G_{fRB} A$	$G_{fRB} B$	$G_{fRB} A$
Mineralinės dulkės f_{RB} , %	$f_{RB} A$	$f_{RB} B$	$f_{RB} A$	$f_{RB} A$	$f_{RB} A$
Plokštumo rodiklis Fl_{RB} , %	$Fl_{RB} 15$	$Fl_{RB} 15$	$Fl_{RB} 15$	$Fl_{RB} 15$	$Fl_{RB} 15$
Dalelių formos rodiklis SI_{RB} , %	$SI_{RB} 10$ $SI_{RB} 5/30$	$SI_{RB} 10$	$SI_{RB} 20$ $SI_{RB} 5/30$	$SI_{RB} 10$ $SI_{RB} 5/30$	$SI_{RB} 20$ $SI_{RB} 5/30$
Dalelių ilgio rodiklis L_{RB} , %	$L_{RB} A$	$L_{RB} A$	$L_{RB} B$	$L_{RB} A$	$L_{RB} C$
Tankis ρ_{cm} , t/m ³	2,73	2,66	2,68	2,75	2,80
Įmirkis W_{cm} , %	0,8	1,4	0,2	0,2	0,2
Atsparumas trypinimui LA_{RB} , %	$LA_{RB} 22$	$LA_{RB} 24$	$LA_{RB} 16$	$LA_{RB} 12$	$LA_{RB} 16$
Atsparumas smūgiams SZ_{RB} , %	SZ_{RB} Declared	SZ_{RB} Declared	$SZ_{RB} 20$	$SZ_{RB} 14$	$SZ_{RB} 18$
Atsparumas nusidėvėjimui M_{DERB} , %	M_{DERB} 11	$M_{DERB} 1$ 3	M_{DERB} 7	M_{DERB} 5	M_{DERB} 9
Atsparumas šaldymui ir šildymui F_{RB} , %	$F_{RB} 1$	$F_{RB} 1$	$F_{RB} 1$	$F_{RB} 1$	$F_{RB} 1$

Dėl svarbos darbui didžiausias dėmesys buvo skirtas Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių nustatymui. Po kiekvieno LA_{RB} ir M_{DERB} bandymo išdžiovinti bandiniai pirmiausiai buvo analizuojami vizualiai. Kiekviena skalda po LA_{RB} ir M_{DERB} bandymų buvo nufotografuojama. Atrinktos charakteringiausios skaldos nuotraukos po LA_{RB} ir M_{DERB} bandymų pateikiamos atitinkamai 2.7 ir 2.8 paveiksluose.

Vizualiai vertinant skaldų bandinius po Los Andželo ir mikro-Devalio bandymų buvo pastebėtas žymiai didesnis dolomito skaldų dalelių nusidėvėjimas lyginant jas su granito skaldų dalelėmis. Absoliuti dauguma dolomito skaldų dalelių buvo netekusios briaunų.

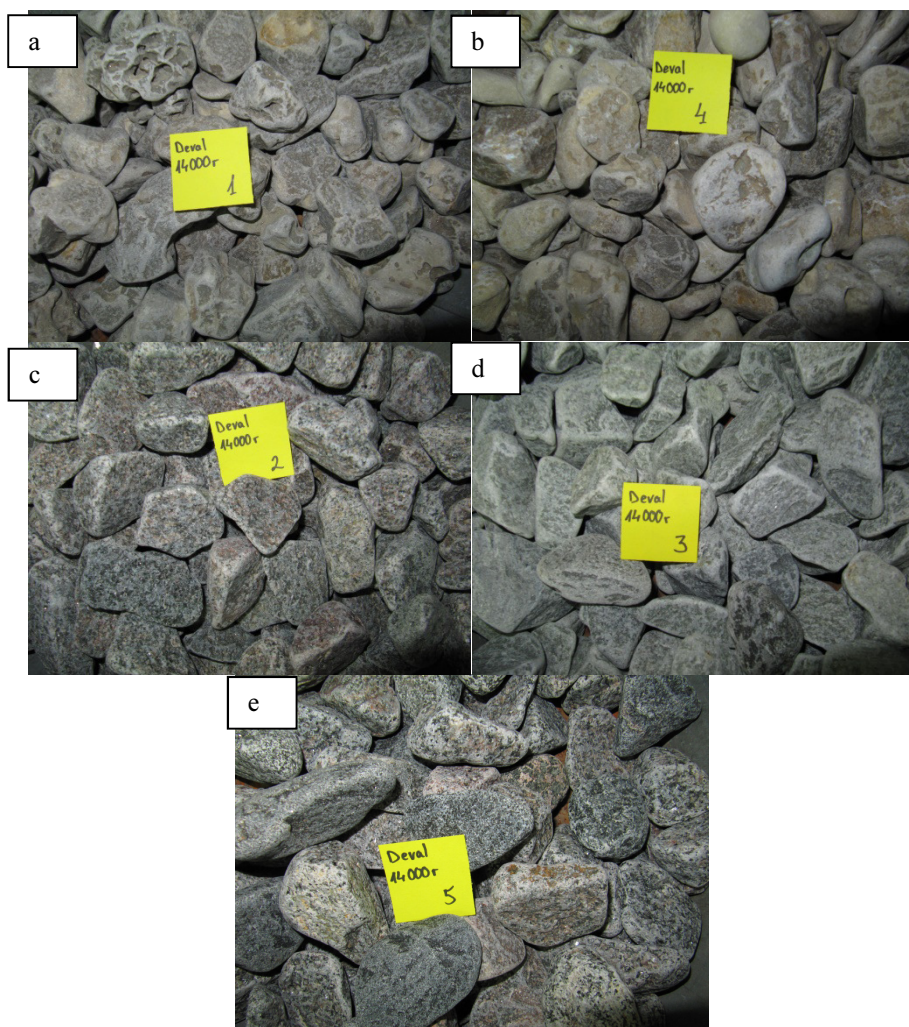
Dolomito skaldos D2 dalelės buvo nugludintos, be briaunų, akivaizdžiai labiau nusidėvėjusios nei dolomito skalda D1 ir granito skaldos G1, G2 ir G3. Dolomito skaldoje D2 bandymo metu susidarė daug lalelių, kurių dydis siekė 8–14 mm.



2.11 pav. Išdžiovinti bandiniai po Los Andželo bandymų (paveikslo a, b, c, d, e dalyse pateiktos atitinkamai D1, D2, G1, G2, G3 skaldos)

Fig. 2.11. The dried samples after the Los Angeles test (figure parts a, b, c, d, e provide the D1, D2, G1, G2, G3 crushed stone)

Granito skaldų bandiniai po Los Andželo ir mikro-Devalio bandymų vizualiai neišsiskyrė dideliais skirtumais, tačiau skaldoje G3 po mikro-Devalio bandymo buvo žymiai daugiau dalelių, kurių dydis siekė iki 10 mm. Mikro-Devalio bandymų rezultatai taip pat parodo, kad granito skalda G3 yra mažiau atspari dėvėjimuisi nei kitos granito skaldos.



2.12 pav. Išdžiovinti bandiniai po mikro-Devalio bandymų (paveikslo a, b, c, d, e dalyse pateiktos atitinkamai D1, D2, G1, G2, G3 skaldos)

Fig. 2.12. The dried samples after the micro-Deval test (figure parts a, b, c, d, e provide the D1, D2, G1, G2, G3 crushed stone)

Visos nustatytos skaldų savybės 3.1 poskyryje vertinamos tikrinant, ar jų dydžiai neviršija maksimalių leistinų dydžių, nurodomų Lietuvos ir užsienio šalių norminiuose dokumentuose (žr. 1.5 lentelę). 3.2. poskyryje skaldų atsparumas trupinimui ir atsparumas dėvėjimuisi vertinami kompleksiskai, jų vertės klasifikuojamos ir panaudojamos balasto ilgalaikiškumui skaičiuoti.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudaryta balasto skaldos parinkimo metodika (BSPM), įvertinanti skaldos fizines ir mechanines savybes bei mechaninių savybių įtaką balasto ilgalaikiškumui.
2. Sudaryta balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodika (BISM). Europoje, kai maksimali leistina ašies apkrova yra 25 t ir naudojami gelžbetoniai pabėgiai, taikant BISM rekomenduojama naudoti tokius įvesties parametrų korekcijos koeficientus: $A_k=1,102$ (matavimo vienetų keitimas); $B_k=1,400$ (maksimali ašies apkrova); $C_k^{-1}=0,667$ (pabėgių tipas).
3. Atlikus granulometrijos analizę nustatyta labai skirtinga skaldų granulometrinė sudėtis. Smulkiųjų dalelių kiekis G_F skaldose kito nuo 0 % iki 1,0 %, mineralinių dulkių kiekis f – nuo 0,3 % iki 1,0 %, plokštumo rodiklis Fl – nuo 3 % iki 12 %, dalelių ilgio rodiklis L – nuo 0 % iki 8 %, o formos rodiklis SI – nuo 1 % iki 17 %.
4. Skaldų tankio ir įmirkio bandymų rezultatai rodo, kad nėra tiesioginio ryšio tarp šių savybių rodiklių. Tankis ρ_{cm} skirtingose uolienose kito nuo $2,66 \text{ t/m}^3$ iki $2,80 \text{ t/m}^3$ (skirtumas iki 5,25 %), tačiau granito skaldų $G1$, $G2$ ir $G3$ įmirkis W_{cm} siekė vos 0,2 % ir buvo 4 kartus mažesnis nei dolomito skaldos $D1$ bei 6 kartus mažesnis nei dolomito skaldos $D2$.
5. Atsparumo šaldymui ir šildymui rodiklis F kito nuo 0,1 % iki 0,5 %. Dolomito skaldai $D2$ šis rodiklis siekė vos 0,2 %, nors jai nustatytas mažiausias tankis ($2,66 \text{ t/m}^3$) ir didžiausias įmirkis (1,4 %). Tai rodo skaldos dalelių atsparumo šaldymui ir šildymui priklausomybę ne tik nuo tankio ir įmirkio, bet ir nuo dalelių cheminio ryšio stiprumo.
6. Nustatytos skaldų mechaninių savybių rodiklių vertės parodo, kad dolomito skaldos yra mažiau atsparios mechaniniam poveikiui. Atsparumo smūgiams rodiklio SZ vertės skirtingose uolienose kito nuo 11,6 % iki 24,7 %, atsparumo trupinimui LA vertės – nuo 9,2 % iki 22,7 %, o atsparumo nusidėvėjimui M_{DE} vertės – nuo 4,9 % iki 12,4 %. Atitinkamai geriausi rodikliai nustatyti granito skaldai ($G2$), o blogiausi – dolomito skaldai ($D2$).

7. Vienodos kilmės uolienų skaldos kietumo ir tvirtumo rodiklių vertės labai skiriasi. Rezultatai rodo, kad dolomito skaldų LA vertės skyrėsi 7,6 %, M_{DE} vertės skyrėsi 17 %. Granito skaldos rodiklių vertės skyrėsi atitinkamai 59,8 % ir 49,0 %.

Balasto fizinių ir mechaninių savybių bei ilgalaikiškumo skaičiavimų rezultatų vertinimas

Skyriuje pateikiamas balasto fizinių ir mechaninių savybių įvertinimas jų faktinės vertės lyginant su norminiuose dokumentuose pateikiamais reikalavimais. Atliktas balasto ilgalaikiškumo prognozinį skaičiavimų vertinimas, suklasifikuoti Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliai. Pateiktas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodikos praktinis realizavimas. Atlikta balasto mechaninių savybių rodiklių klasifikacijos taikymo kaštų ir naudos analizė.

Skyriaus tematika paskelbtos trys autoriaus publikacijos *nas et al.* 2013; Ramūnas *et al.* 2014; Ramūnas *et al.* 2016).

3.1. Balasto faktinių savybių ir norminių reikalavimų lyginamoji analizė

Balasto savybių įvertinimui pagal norminių dokumentų reikalavimus naudojami eksperimentinio tyrimo metu gauti skaldų savybių bandymo rezultatai. Nustatytos skaldų ir jas sudarančių dalelių savybės (pateiktos 2.4 poskyryje, 2.2 lentelė-

je) vertinamos tikrinant, ar jų dydžiai neviršija maksimalių leistinų dydžių, nurodomų Lietuvos ir užsienio šalių (Rusijos, Suomijos, Ispanijos, Vokietijos, Austrijos, JAV ir Kanados, Australijos) norminiuose dokumentuose (žr. 1.5 lentelę).

Granulometrijos kategorija. Granulometrijos kategorija nustatyta granulometrinės sudėties tyrimo (pagal LST EN 933-1:2012) metu nubraižius granulometrinės sudėties kreives ir patikrinus, į kurias kategorijas kreivės labiausiai tinka priskirti. Granulometrijos kreivės ir skaldų granulometrinės sudėties tyrimo rezultatai pateikti C priede.

3.1 lentelėje pateikti granulometrinės kategorijos nustatymo rezultatai, išskiriant, kurioms kategorijoms galima priskirti skaldas D1, D2, G1, G2, ir G3.

Nustatyta, kad skaldų D2 ir G3 dalelių dydžių frakcijos netenkina reikalavimų nei vienai kategorijai, o G2 skaldą galima priskirti net trimis kategorijoms.

Lietuvos norminiai dokumentai nurodo (1.5 lentelė), kad balastui įrengti naudojama skalda turi būti G_CRB C kategorijos, todėl iš tyrimams parinktų skaldų naudoti Lietuvoje (ir Suomijoje) tinkamos tik D1 ir G2 skaldos.

3.1 lentelė. Skaldų granulometrijos klasių nustatymo rezultatai

Table 3.1. The results of testing the crushed stone granulometry classes

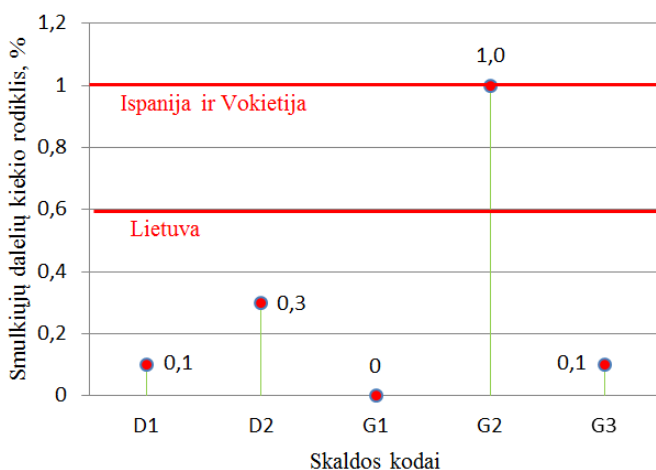
Bandinio kodas	Balasto fr. 31,5/50 mm	Balasto fr. 31,5/63 mm			
	Granulometrinė kategorija				
	G _C RB A	G _C RB B	G _C RB C	G _C RB D	
D1	N	N	T	T	
D2	N	N	N	N	
G1	N	N	N	T	
G2	T	T	T	N	
G3	N	N	N	N	

Čia *T* – atitinka nurodytą kategoriją; *N* – neatitinka nurodytos kategorijos.

G2 skaldą galima priskirti ne tik G_CRB C kategorijai, bet ir G_CRB A bei G_CRB B, kurios naudojamos atitinkamai Ispanijoje ir Vokietijoje. G_CRB A bei G_CRB B granulometrijos kategorijos skalda naudojama ir Suomijoje, tačiau žemesnių klasių keliams. G_CRB D kategoriją atitinka D1 ir G1 skaldos.

Smulkiosios dalelės. Smulkiųjų dalelių kiekiai buvo nustatyti po granulometrinės sudėties tyrimo (pagal LST EN 933-1:2012). Skaldų granulometrinės sudėties tyrimo rezultatai pateikti C priede.

3.1 paveiksle pateikti smulkiųjų dalelių kiekių tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 smulkiųjų dalelių kiekių ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450 pateiktos 2.3 lentelėje.



3.1 pav. Smulkiųjų dalelių kiekių tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.1. Determination results of fine particles quantities and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

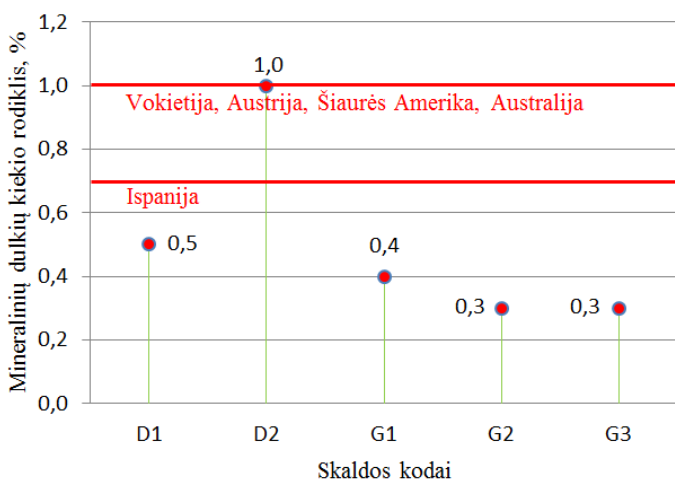
AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad balastui įrengti naudojamos skaldos sudėtyje turi būti ne daugiau kaip 0,6 % smulkiųjų dalelių, todėl iš tyrimams parinktų skaldų naudoti Lietuvoje tinkami visi, išskyrus G2 skaldą (3.1 pav.). Čia reikia paminėti, kad po granulometrijos klasės nustatymo išaiškėjo, kad Lietuvoje naudoti galima tik D1 ir G2 skaldas, o po smulkiųjų dalelių kiekio nustatymo jau galima teigti, kad naudojimui (Lietuvoje) priimtina tik D1 skalda.

Tačiau G2 skaldos smulkiųjų dalelių kiekio rodiklis neviršija leistinojo Ispanijoje ir Vokietijoje, o tai kelia abejones dėl Lietuvoje priimto ribojimo pagrįstumo.

Mineralinės dulkės. Mineralinių dulkių kiekiai buvo nustatyti po granulometrinės sudėties tyrimo (pagal LST EN 933-1:2012). Skaldų granulometrinės sudėties tyrimo rezultatai pateikti C priede.

3.2 paveiksle pateikti mineralinių dulkių kiekių tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 mineralinių dulkių kiekių ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.

Lietuvos norminiuose dokumentuose mineralinių dulkių rodiklio dydis neregamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nenurodo jokio įmonėje priimto ribojimo šiai savybei. Tačiau Vokietijos, Austrijos, Šiaurės Amerikos bei Australijos norminiuose dokumentuose nurodoma, kad balastui įrengti naudojamos skaldos sudėtyje turi būti ne daugiau kaip 1,0 % mineralinių dulkių, o Ispanijoje šis dydis turi būti ne didesnis nei 0,7 %. Taigi visos tirtos skaldos tenkina minėtų šalių normas, ir tik skalda D2 būtų nepriimtina naudoti Ispanijoje.



3.2 pav. Mineralinių dulkių kiekių tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

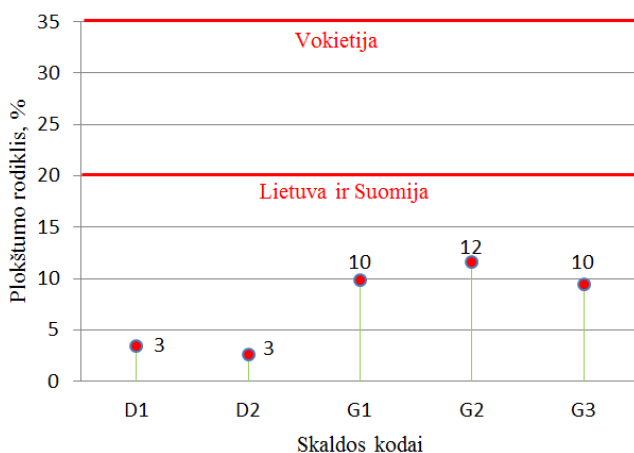
Fig. 3.2. Determination results of mineral dust quantities and maximum permissible values of this parameter abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Smulkiųjų dalelių ir mineralinių dulkių kiekių rodikliams nurodyti maksimalias leistinas ribas būtina, tačiau jos gali būti mažesnės nei AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo taikantys smulkiųjų dalelių kiekio rodikliui ($\leq 0,6\%$). Jeigu priimtume, kad maksimali leistina riba pastariesiems dviem rodikliams gali būti nedidesnė nei 1 %, tuomet kraštutiniu atveju naujos balasto skaldos užteršimas

siektų 2 %. Toks taršos kiekis nėra labai reikšmingas vertinant tai, kad didžioji dalis taršos ir degradacijos susidaro dėl eismo apkrovų.

Plokštumo rodiklis. Plokštumo rodiklis kiekvienai skaldai buvo nustatytas vadovaujantis standarto LST EN 933-3:2012 nurodymais. Skaldų plokštumo rodiklių ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.3 paveiksle pateikti plokštumo rodiklių tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 plokštumo rodiklių ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.



3.3 pav. Plokštumo rodiklio tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.3. Determination results of particle flakiness index and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Lietuvos norminiuose dokumentuose plokštumo rodiklio leistini dydžiai nereglamentuojami, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko 20 % maksimalią leistiną ribą. Toks pat dydis leistinas ir Suomijoje, o Vokietijoje leidžiamas net 35 % plokštumo rodiklis. Kaip matoma 3.3 paveiksle, nė vienos iš tirtų skaldų plokštumo rodiklis nesiekė nei 15 %.

Plokštumo rodikliui nurodyti maksimalias leistinas ribas tikslinga dėl plokščių dalelių įtakos kelio konstrukcijos gebėjimui priešintis horizontalioms jėgoms, o 20 % riba šiam rodikliui yra pakankamai racionali ir taikyti didesnę ribą būtų netikslinga. Be to, dolomito skaldos dalelės retai būna plokščios formos,

dažniau apvalinos ir tai atspindėjo rezultatuose, kadangi dolomito skaldų D1 ir D2 plokštumo rodikliai siekė nuo 2,5 % iki 3,5 %.

Formos rodiklis. Dalelių formos rodiklis kiekvienai skaldai buvo nustatytas vadovaujantis standarto LST EN 933-4:2008 nurodymais. Skaldų formos rodiklių ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.4 paveiksle pateikti formos rodiklių tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 formos rodiklių ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.

Lietuvos norminiuose dokumentuose formos rodiklio dydis neregamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nenurodo jokio įmonėje priimto ribojimo šiai savybei. Tačiau Ispanijos, Vokietijos, Austrijos, Šiaurės Amerikos bei Australijos norminiuose dokumentuose šis rodiklis yra normuotas. Tik Australijoje taikoma norma neįtraukiama į palyginimą, nes skiriasi rodiklio nustatymo metodika.

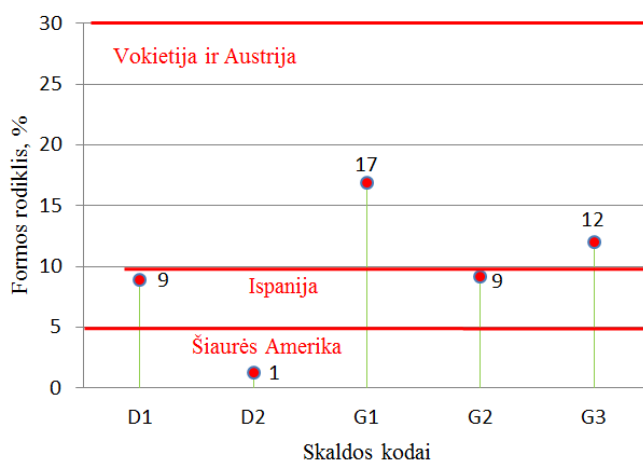
Įdomu tai, kad Vokietijoje ir Austrijoje formos rodikliui taikomi visiškai priešaringi reikalavimai nei JAV ir Kanadoje. Pastarieji nurodo, kad balastui įrengti naudojamos skaldos formos rodiklis turi būti ne didesnis kaip 5,0 %, o Vokietijoje ir Austrijoje reikalaujamas formos rodiklis nemažesnis kaip 5 % ir ne didesnis kaip 30 %.

Ispanijoje formos rodiklis turi būti nedidesnis nei 10 %. Taigi JAV reikalavimus šiam rodikliui tenkina tik D2 skalda, o Vokietijos ir Austrijos reikalavimus – priešingai – visos likusios (D1, G1, G2, G3).

Formos rodiklio maksimalios leistinos ribos taikymas Lietuvoje yra diskutuotinas klausimas, o neturint patirties šiuo klausimu galima remtis priimta praktika Vokietijoje bei Austrijoje, ir norminiuose dokumentuose pateikti reikalavimą, kad formos rodiklis būtų nemažesnis kaip 5 % ir ne didesnis kaip 30 %.

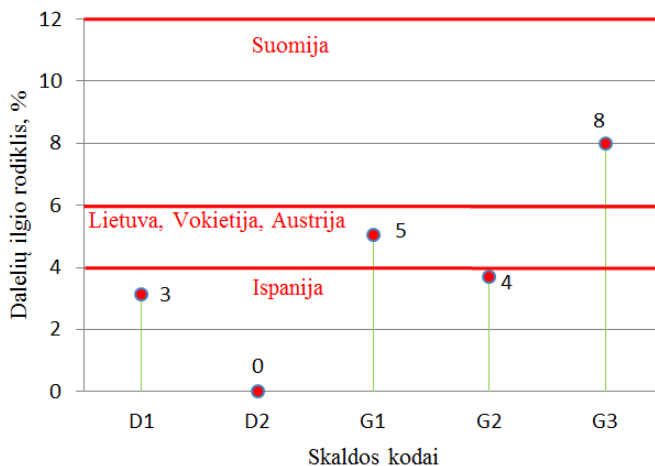
Dalelių ilgio rodiklis. Dalelių ilgio rodiklis kiekvienai skaldai buvo nustatytas atliekant formos rodiklio nustatymą vadovaujantis standarto LST EN 933-3:2012 nurodymais. Skaldų ilgio rodiklių ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.5 paveiksle pateikti balasto dalelių ilgio rodiklių tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 dalelių ilgio rodiklių ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.



3.4 pav. Formos rodiklio tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.4. Determination results of particle shape index and maximum permissible values of this parameter abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)



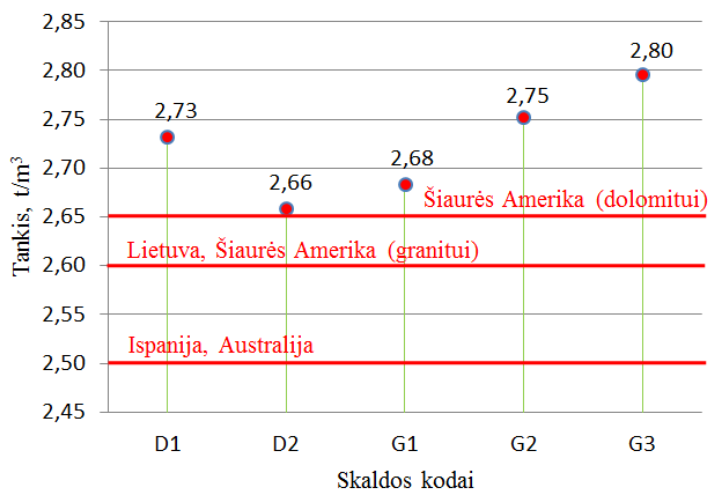
3.5 pav. Dalelių ilgio rodiklio tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.5. Determination results of particle length indicator and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Lietuvos norminiuose dokumentuose dalelių ilgio rodiklio maksimalus leistinas dydis neregamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko 6,0 % maksimalią leistiną ribą. Toks pat dydis leistinas ir Vokietijoje bei Austrijoje. Labiau varžanti 4,0 % riba taikoma Ispanijoje, o Suomijoje dalelių ilgio rodiklis turi būti ne didesnis nei 12 %, o šią sąlygą tenkina visos tirtos medžiagos. Tačiau Lietuvoje netinkama naudoti G3 skalda, o Ispanijoje G3 bei G1. Dalelių ilgio rodikliui taikyti 6,0 % ribą pakankamai racionalu.

Tankis. Skaldas sudarančių mineralinių dalelių (uolienos gabalų) tankiai buvo nustatyti vadovaujantis standarto LST EN 1097-6:2013 nurodymais. Skaldos dalelių tankiai ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.6 paveiksle pateikti balasto dalelių tankio tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 tankiai ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.



3.6 pav. Dalelių tankio tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio apatinė rinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.6. Determination results of particle density and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

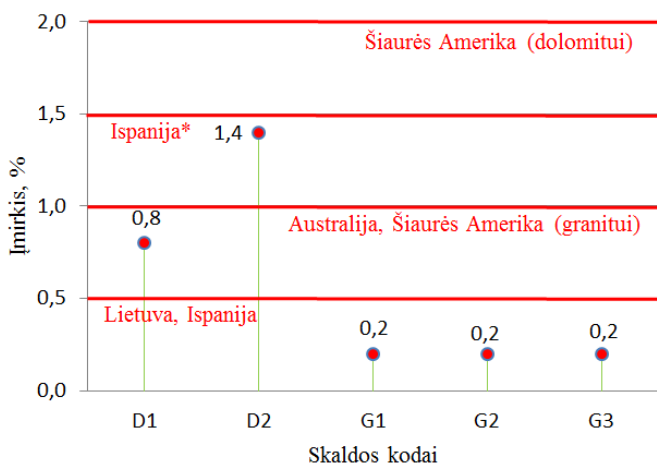
Lietuvos norminiuose dokumentuose dalelių tankio minimalus leistinas dydis neregamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko $2,60 \text{ t/m}^3$ minimalią leistiną ribą. Toks pat dydis leistinas ir JAV bei Kanadoje

granito skaldai, tačiau dolomito skaldai šiose šalyse reikalaujama ne mažesnio nei $2,65 \text{ t/m}^3$ tankio. Ispanijoje ir Australijoje riba yra $2,50 \text{ t/m}^3$. Kaip matoma 3.6 paveiksle, visos tirtos medžiagos tenkina reikalavimus tankiui.

Tačiau čia reikia paminėti, kad JAV ir Kanadoje taikomi ribojimai išskiriant ribas atskirai granitui ir dolomitui yra labai teisingas reguliavimas, nes nuo dolomito skaldos tankio labai priklauso jos kietumas, atsparumas dilimui bei smulkėjimui (trupėjimui), kurio metu atsiranda žymus kiekis smulkiųjų dalelių ir mineralinių dulkių. Pastarosios dalelės pavojingos dėl dolomito skaldos polinkio cementuotis.

Įmirkis. Skaldas sudarančių mineralinių dalelių įmirkio rodikliai buvo nustatyti vadovaujantis standarto LST EN 1097-6:2013 nurodymais. Skaldos dalelių įmirkio ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.7 paveiksle pateikti balasto dalelių įmirkio tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 įmirkio ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.



3.7 pav. Dalelių įmirkio tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.7. Determination results of particle water absorption and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Lietuvos norminiuose dokumentuose dalelių įmirkio maksimalus leistinas dydis nereglamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko

0,5 % maksimalią leistiną ribą. Tokia pat riba taikoma ir Ispanijoje, tačiau su išimtimi: leidžiama naudoti medžiagas, kurių įmirkio rodiklis ne didesnis nei 1,5 %, kai papildomai atliekamas magnio sulfato bandymas.

JAV ir Kanadoje normuojant įmirkio (kaip ir tankio) maksimalias leistinas ribas išskiriami atskiri reikalavimai granito (ne daugiau kaip 1,0 %) ir dolomito (ne daugiau kaip 2,0 %) skaldoms. Šio pavyzdžio laikantis, Lietuvoje tikslinga priimti tokias ribas:

- granito skaldai $W_{cm} \leq 0,5 \%$;
- dolomito skaldai $W_{cm} \leq 1,5 \%$.

Taikant šias ribas atsirastų galimybė panaudoti dolomito skaldą balastui įrengti geležinkelio linijose, kuriose būna (ar numatoma, kad bus) nedideli metiniai eismo apkrovų intensyvumai (MEAI). Tikėtina, kad dolomito skaldai taikomą apribojimą reiktų griežtinti (taikyti $W_{cm} \leq 1,0 \%$), tačiau tikslinimui reiktų atlikti išsamesnius tyrimus.

3.7 paveiksle matyti, kad granito skaldos (G1, G2 ir G3) tenkina visose šalyse taikomus reikalavimus medžiagos įmirkio rodikliui, tačiau dolomito skaldų (D1 ir D2) AB „Lietuvos geležinkeliai“ neleistų naudoti balasto prizmei įrengti.

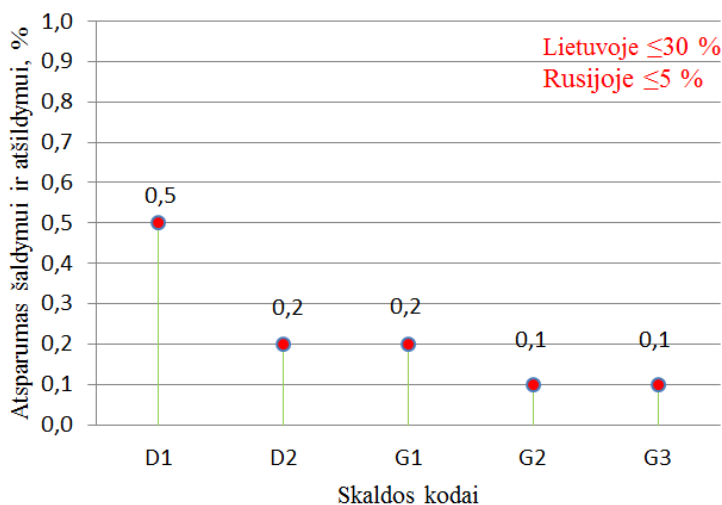
Atsparumas šaldymui ir atšildymui. Skaldas sudarančių mineralinių dalelių atsparumo šaldymui ir atšildymui rodikliai buvo nustatyti vadovaujantis standarto LST EN 1367-1:2007 nurodymais. Skaldos dalelių atsparumo šaldymui ir atšildymui ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.8 paveiksle pateikti balasto dalelių atsparumo šaldymui ir atšildymui tyrimų rezultatai, nenurodyti leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir Rusijos Federacijoje. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 atsparumo šaldymui ir atšildymui ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.

Lietuvos norminiuose dokumentuose dalelių atsparumo šaldymui ir atšildymui maksimalus leistinas dydis nereglamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko 30 % maksimalią leistiną ribą. Rusijoje ši riba yra daug mažesnė – atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklis turi būti ne didesnis nei 5 %.

Dėl nustatytų atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklių dydžių skaldoms D1, D2, G1, G2 ir G3 tampa akivaizdu, kad AB „Lietuvos geležinkeliai“ bei Rusijos norminių dokumentų nurodomos maksimalios ribos yra neracionalios. Nustatyti rodikliai (iš jų ir dolomito skaldoms) nedidesni nei 0,5 %, o tai yra 10 kartų mažiau nei maksimaliai leidžiama Rusijoje ir net 60 kartų mažiau, nei taikoma Lietuvoje.

Dėl klimatinių sąlygų esančių Lietuvos teritorijoje, atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklis yra svarbus ir jo maksimalų leidžiamą dydį norminiuose dokumentuose nurodyti būtina. Tačiau šis dydis gali ir turi būti sumažintas bent iki 1 %. Tik tokiu atveju ribojimas įgaus prasmę.



3.8 pav. Dalelių atsparumo šaldymui ir atšildymui tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir Rusijos Federacijoje (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės)

Fig. 3.8. Determination results of particle resistance to freezing and thawing and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values)

3.6 ir 3.7 paveiksluose pateikti grafikai rodo, kad mažesnis balasto dalelių tankis lemia didesnę jų įmirkį, tačiau 3.8 paveikslo grafikas nerodo atsparumo šaldymui ir atšildymui priklausomybės nuo įmirkio (akivaizdus pavyzdys yra skaldos D2 atvejis).

Atsparumas smūgiams. Skaldas sudarančių mineralinių dalelių atsparumo smūgiams rodikliai buvo nustatyti vadovaujantis standarto LST EN 1097-2:2010 nurodymais. Skaldos dalelių atsparumo smūgiams ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

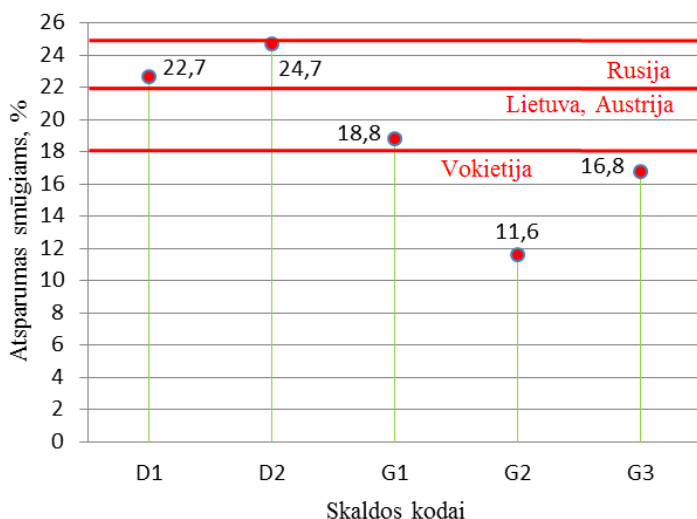
3.9 paveiksle pateikti balasto dalelių atsparumo smūgiams tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 atsparumo smūgiams ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.

Lietuvos norminiuose dokumentuose dalelių atsparumo smūgiams maksimalus leistinas dydis neregamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko 22 % maksimalią leistiną ribą (analogiškai ir Austrijoje). Rusijoje ši riba yra 25 %, o Vokietijoje daug griežčiau normuojant šį rodiklį nurodomas 18 % maksimalus leistinas dydis.

Kaip matoma 3.9 paveikslo grafike, granito skaldos G2 ir G3 tenkina visose minėtose šalyse taikomus reikalavimus, G1 netinka Vokietijoje, tačiau dolomito skaldos D1 ir D2 priimtini būtų tik Rusijoje, o Lietuvos (ir Austrijos) norminių reikalavimų atsparumui smūgiams netenkina. Be to, Vokietijoje nustatyta dar griežtesnė 14 % riba šiam rodikliui, jei linija traukiniai važiuos didesniu nei 230 km/val. greičiu.

Kai bėgiu riedantis ratas atsiranda padėtyje tarp pabėgių, jis iššaukia pabėgių pasikėlimą. Toks pabėgių pasikėlimas pasikeičia į staigų nusileidimą į balastą, kai ratas nurieda ties pabėgiu. Šis staigus pabėgio nusileidimas, skatina balasto dalelių skilimą kontakto su pabėgiu vietose. Todėl atsparumo smūgiams rodiklis labiausiai parodo, kaip greitai degraduos balasto dalelės po pabėgiu.

Dėl rodiklio svarbos balasto degradacijos spartai, jo maksimalaus leistino dydžio mažinti nerekomenduojama, tačiau dolomito skaldoms racionalu taikyti Rusijoje priimtą ribojimą (ne daugiau 25 %), kuris paliktų galimybę dolomito skaldų panaudojimui geležinkelio linijose, kuriose būna (ar numatoma, kad bus) nedideli metiniai eismo apkrovų intensyvumai (MEAI). Jei yra atliekamas Los Andželo bandymas, tuomet atsparumo smūgiams rodiklio nustatinėti nereikia.



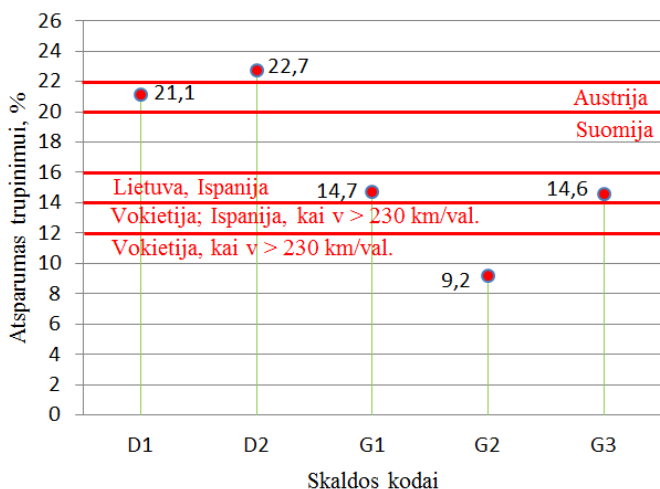
3.9 pav. Dalelių atsparumo smūgiams tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.9. Determination results of particle impact resistance and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Atsparumas trupinimui. Skaldas sudarančių mineralinių dalelių atsparumo trupinimui (Los Andželo) rodikliai buvo nustatyti vadovaujantis standarto LST EN 1097-2:2010 nurodymais. Skaldos dalelių atsparumo trupinimui ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.10 paveiksle pateikti balasto dalelių atsparumo trupinimui tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 atsparumo trupinimui ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.

Lietuvos norminiuose dokumentuose dalelių atsparumo trupinimui maksimalus leistinas dydis nereglamentuojamas, o AB „Lietuvos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko 16 % maksimalią leistiną ribą (analogiškai ir Ispanijoje). Ši maksimali leistina 16 % riba yra gana griežtas reikalavimas, labiau ribojamas tik Vokietijoje (14 %). Tačiau Suomijoje ir Austrijoje leidžiamos šiek tiek didesnės atsparumo trupinimui reikšmės: atitinkamai 20 % ir 22 %.



3.10 pav. Dalelių atsparumo trupinimui tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

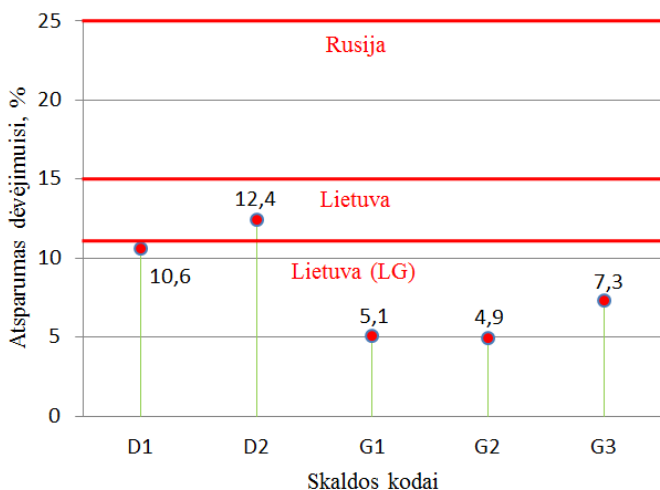
Fig. 3.10. Determination results of particle resistance to fragmentation and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Kaip matoma 3.10 paveikslo grafike, tik granito skalda G2 tenkina Lietuvoje, Ispanijoje, Vokietijoje bei Suomijoje ir Austrijoje taikomus reikalavimus, o granito skaldos G1 ir G3 netenkina tik Vokietijoje taikomų reikalavimų. Tačiau

dolomito skaldų D1 ir D2 atsparumo trupinimui rodikliai yra didesni nei reikalaujama Lietuvoje, Ispanijoje ir Suomijoje. Dėl Lietuvoje labai ribotos balastui tinkamos skaldos pasiūlos šio rodiklio normavimas turėtų būti koreguojamas, nes priešingu atveju lieka nesudarytos sąlygos kitų skaldų panaudojimui geležinkelio linijose, kuriose būna (ar numatoma, kad bus) nedideli metiniai eismo apkrovų intensyvumai (MEAI).

Atsparumas dėvėjimuisi. Skaldas sudarančių mineralinių dalelių atsparumo dėvėjimuisi (mikro-Devalio) rodikliai buvo nustatyti vadovaujantis standarto LST EN 1097-1:2011 nurodymu. Skaldos dalelių atsparumo dėvėjimuisi ir kitų savybių tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

3.11 paveiksle pateikti balasto dalelių atsparumo dėvėjimuisi tyrimų rezultatai ir parodyti maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir Rusijoje. Skaldų D1, D2, G1, G2, ir G3 atsparumo dėvėjimuisi ir kitų savybių klasės pagal standartą LST EN 13450:2013 pateiktos 2.3 lentelėje.



3.11 pav. Dalelių atsparumo dėvėjimuisi tyrimų rezultatai ir maksimalūs leistini šio parametro dydžiai Lietuvoje ir Rusijoje (taškai – laboratorijoje nustatytos savybės reikšmės; stora linija – savybės rodiklio viršutinė riba nurodytoje šalyje)

Fig. 3.11. Determination results of particle resistance to wear and maximum permissible values of this parameter in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values; thick line – the upper limit of property's indicator in a given country)

Lietuvos norminiuose dokumentuose (1.5 lentelė) reglamentuojama dalelių atsparumo dėvėjimuisi maksimali leistina reikšmė yra 15 %, tačiau AB „Lietu-

vos geležinkeliai“ nurodo, kad taiko 11 % maksimalią leistiną ribą. Ši maksimali leistina 11 % riba yra gana griežtas reikalavimas, kuris, kaip matoma 3.11 paveikslo grafike, dolomito skaldą D2 priskiria prie netinkamų naudoti medžiagų, nors Lietuvos oficialiuose norminiuose dokumentuose nurodomas maksimalus leistinas dydis nėra viršijamas.

3.2 lentelė. Rekomenduojamos leistinos rodiklių reikšmės skaldų norminiam reglamentavimui, kai savybės nustatomos pagal standartą LST EN 13450:2013
Table 3.2. The recommended regulatory limits for values of crushed stone indicators, when characteristics are determined in accordance with LST EN 13450:2013

Charakteristika	Dolomitas	Granitas
Granulometrijos kategorija G_{CRB}	C	
Smulkiosios dalelės G_{FRB} , %	$\leq 1,0$	
Mineralinės dulkės f_{RB} , %	$\leq 1,0$	
Plokštumo rodiklis FI_{RB} , %	≤ 20	
Dalelių formos rodiklis SI_{RB} , %	5–30	
Dalelių ilgio rodiklis L_{RB} , %	$\leq 6,0$	
Tankis ρ_{cm} , t/m ³	$\geq 2,65$	$\geq 2,60$
Įmirkis W_{cm} , %	$\leq 1,5$	$\leq 0,5$
Atsparumo smūgiams vertinimas Impact metodu SZ_{RB} , %	≤ 25	≤ 22
Atsparumas šaldymui ir šildymui F_{RB} , %	$\leq 1,0$	

3.2 lentelėje pateikiamos rekomenduojamos leistinos rodiklių reikšmės skaldų norminiam reglamentavimui, tačiau joje nėra rekomenduojamų balasto atsparumo trupinimui ir atsparumo dėvėjimuisi ribinių dydžių. Dėl (2.2.) poskyryje plačiau aprašomų priežasčių, atsparumo trupinimui (Los Andželo bandymas) ir atsparumo dėvėjimuisi (mikro-Devalio bandymas) rodikliai vertinami kompleksiskai (3.2.) poskyryje, kur pateikiamas rekomenduojamas šių rodiklių leistinų dydžių klasifikavimas.

3.2. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo rezultatų vertinimas ir mechaninių savybių klasifikavimas

Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimai atliekami naudojant Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklius, nustatytus laboratoriniais ėminių bandymais. Gaunami rezultatai yra skaldos (mineralinės medžiagos) svarbiausių mechaninių savybių rodiklių kompleksinis įvertinimas.

Laboratorijoje tirtoms medžiagoms kompleksinis dėvėjimosi rodiklis N_A ir balasto ilgalaikiškumas L_M arba $L_{G/B}$ (atitinkamai mediniams ir gelžbetoniniams pabėgiams) apskaičiuojami pagal 2.2 poskyryje pateiktas (2.4), (2.6) ir (2.8) formules. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje „Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimų rezultatai“.

3.3 lentelė. Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimų rezultatai

Table 3.3. Calculations results of ballast aggregate lifespan

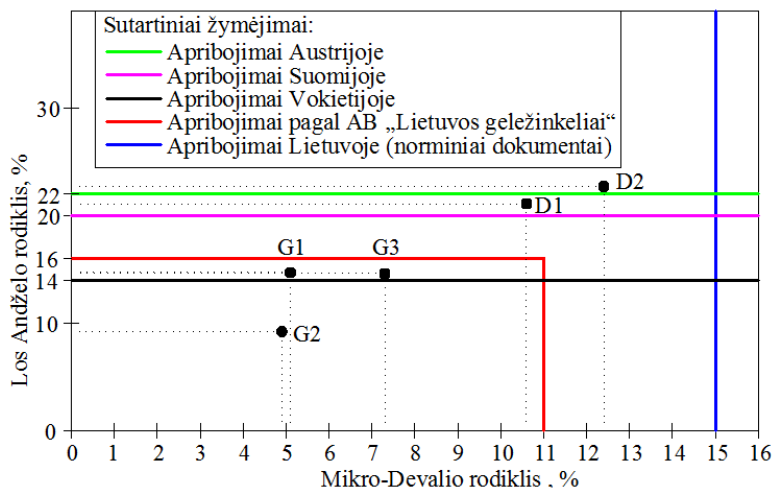
Medžiagos kodas	Ilgalaikiškumo skaičiavimų rezultatai		
	N_A , %	L_M , MGT	$L_{G/B}$, MGT
D1	74,1	294	196
D2	84,7	196	131
G1	40,2	1073	715
G2	33,7	1375	917
G3	51,1	707	472

Čia $D1$, $D2$ – dolomito skaldos; $G1$, $G2$, $G3$ – granito skaldos; N_A – kompleksinis dėvėjimosi rodiklis; L_M – balasto prognozinis ilgalaikiškumas, kai pabėgiai mediniai; $L_{G/B}$ – balasto prognozinis ilgalaikiškumas, kai pabėgiai gelžbetoniniai; MGT – milijonai bruto tonų, pravežtų geležinkelio bėgiais.

3.12 paveiksle nubraižytas grafikas pagal 2.2 lentelėje pateiktus Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklius. Jame pateikiami dalelių atsparumo dėvėjimuisi ir atsparumo trupinimui nustatymo rezultatai ir leistini šių parametru dydžiai Lietuvoje ir užsienio šalyse. Šiame paveiksle matoma, kad pagal Lietuvoje galiojančius norminius dokumentus visų laboratorijoje tirtų medžiagų minėti tieji rodikliai yra tinkami, nes neviršijama mikro-Devalio rodiklio maksimali leistina riba, o Los Andželo rodiklis nenormuojamas.

3.3 lentelėje pateikiamuose skaičiavimų rezultatuose matomas ryškus skirtumas tarp prognozuojamų ilgalaikiškumo dydžių, kai pabėgiai mediniai ir kai pabėgiai gelžbetoniniai. Skirtumas apytiksliai lygus 33 % dėl korekcijos koeficiento C_k , naudojamo įvertinti gelžbetoninių pabėgių įtaką balasto degradacijai.

Palyginus skaldoms G2 ir D2 atliktų skaičiavimų rezultatus, matyti, kad priklausomai nuo mechaninių rodiklių, ilgalaikiškumas skirtingoms medžiagoms gali skirtis net 7 kartus. Nepaisant to, dolomito skaldai D1 prognozuojama galimybė atlaikyti beveik 200 MGT eismo apkrovas, kai viršutinė kelio konstrukcija įrengiama su gelžbetoniais pabėgiais. Šis rezultatas rodo balasto ilgalaikiškumą idealiomis eksploatacinėmis sąlygomis – priimama, kad nėra taršos iš pobalastinio sluoksnio ir žemės sankasos bei kitų išorinių šaltinių. Kadangi 76 % balasto taršos atsiranda dėl jo paties degradacijos (Selig and Waters 1994), galima prognozuojamą 200 MGT ilgalaikiškumą mažinti 24 % ir gauti apytiksliai 150 MGT prognozinį ilgalaikiškumą. Analogiškai paskaičiavus granito skaldos G2 ilgalaikiškumą L_{GB} gaunamas 688 MGT prognozuojamas ilgalaikiškumas. 2015 metais Lietuvos geležinkelio bendrai sudėjus buvo 397 km kelio ruožų, kuriais vidutiniškai pravežta 595 MGT. Nustatyta ruožų, kuriais pravežta daugiau nei 890 MGT (0,9 km), 740 MGT (18,3 km), 690 MGT (42,4 km) ir panašiai. Visuose šiuose ruožuose uždelstas kapitalinis remontas. Daugumoje šių ruožų vyksta intensyvus traukinių eismas, tačiau kelio būklė yra pakankamai gera.



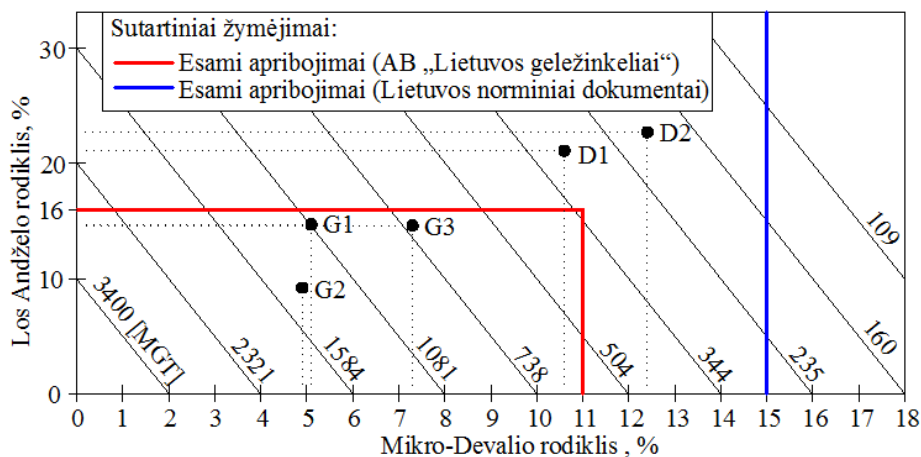
3.12 pav. Dalelių atsparumo dėvėjimuisi ir atsparumo trupinimui nustatymo rezultatai ir leistini šių parametų dydžiai Lietuvoje ir užsienyje (taškai – laboratorijoje nustatytos savybių reikšmės)

Fig. 3.12. Determination results of particles resistance to wear and fragmentation and permissible values of these parameters in Lithuania and abroad (points – laboratory detected characteristics values)

Reikia paminėti, kad modelyje nėra įvertinta balasto degradacija dėl balasto plukimo, atliekamo kelio priežiūros ar einamojo remonto metu. Plukant balastą pastarasis degraduoja daug greičiau, o realus ilgalaikiškumas labai priklauso nuo balasto plukimo (kelio pamušimo) kartų. Be to, balasto tarša iš išorės ar tarša dėl sankasos gruntų skverbimosi gali kisti. Pavyzdžiui, tarša iš išorinių šaltinių stoties keliuose gali būti gerokai didesnė, o gruntų skverbimasis gali būti stabdomas sankasos įrengimui naudojant geotekstilę. Dėl pastarųjų priežasčių, nuspręsta ilgalaikiškumo prognozes skaičiavimus atlikti laikantis prielaidos, kad bus idealios eksploatacinės sąlygos.

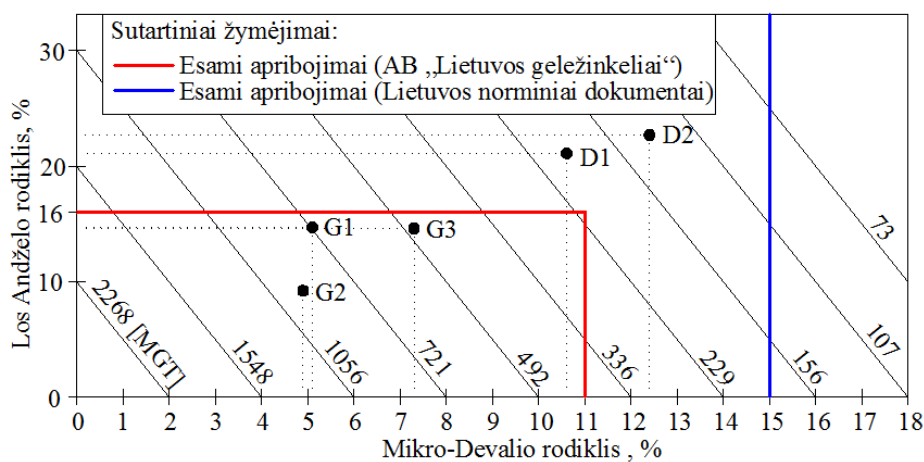
Atlikus skaičiavimus, analogiškai pateiktiems 3.3 lentelėje pagal (2.2.) poskyryje pateiktas (2.4), (2.6) ir (2.8) formules, buvo sudaryti atskiri balasto ilgalaikiškumo prognozavimo grafiniai modeliai: 3.13 paveiksle – kai pabėgiai mediniai, o 3.14 paveiksle – kai pabėgiai gelžbetoniniai.

Šie grafiniai modeliai (3.13 ir 3.14 pav.) toliau naudojami kaip pagrindas Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliams klasifikuoti. Klasifikuojami mechaninių savybių parametrų dydžiai suskirstomi į penkias kategorijas, kaip pateikta 3.4 lentelėje.



3.13 pav. Balasto ilgalaikiškumo prognozavimo grafinis modelis, kai pabėgiai mediniai (taškai – laboratorijoje nustatytos savybių reikšmės)

Fig. 3.13. Lifespan prognostic graphic model of ballast aggregate as sleepers are made of wood (points – laboratory detected characteristics values)



3.14 pav. Balasto ilgalaikiškumo prognozavimo grafinis modelis, kai pabėgiai gelžbetoniniai (taškai – laboratorijoje nustatytos savybių reikšmės)

Fig. 3.14. Lifespan prognostic graphic model of ballast aggregate as sleepers are made of concrete (points – laboratory detected characteristics values)

3.4 lentelė. Balasto skaldos mechaninių savybių kategorijų skirstymas

Table 3.4. Division of ballast aggregate mechanical properties categories

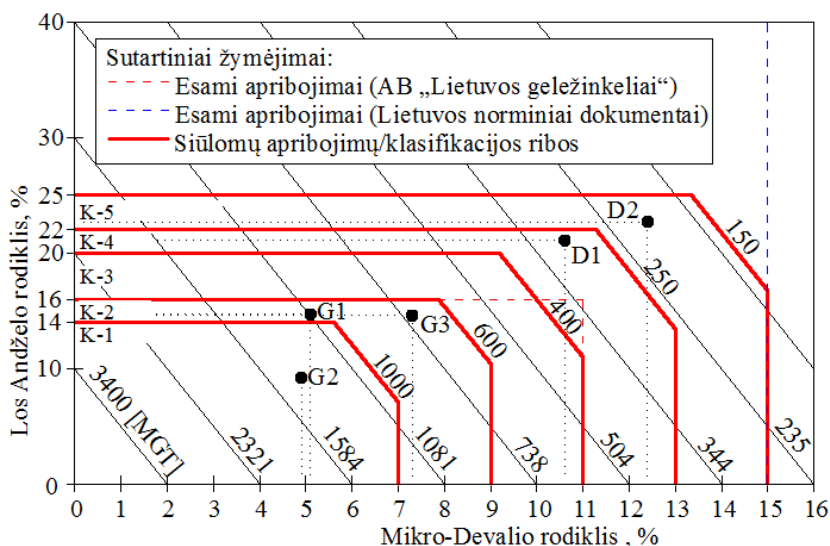
Balasto skaldos mechaninių savybių kategorija	Geležinkelio linijos kategorija	Metinis eismo apkrovų intensyvumas, MGT
K-1	GLK - Greitkeliai	-
	GLK - Intensyvaus eismo	≥ 50
K-2	GLK-I	30–50
	GLK-II	9–30
K-3	GLK-III	
K-4	GLK-II GLK-III GLK-IV	≤ 9
	GLK-V Kiti keliai	2–9
K-5	GLK-V Kiti keliai	≤ 2

3.4 lentelėje pateikti geležinkelio linijos kategorijai „Kiti keliai“ priklauso privažiuojamieji keliai, vietinės ir jungiančiosios linijos. Balasto mechaninių savybių kategorijai K-1 priskirtos geležinkelių magistralinės linijos keleiviniams traukiniams važiuoti nuo 160 km/val. iki 200 km/val.

Kaip minėta, 3.13 ir 3.14 paveiksluose esantys grafikai imami kaip pagrindas Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliams klasifikuoti. Siūlomos apribojimų ribos kiekvienai kategorijai įbrėžiamos atsižvelgiant į 3.12 paveikslą, kuriame pateikti dalelių atsparumo dėvėjimuisi ir atsparumo trupinimui nustatymo rezultatai ir leistini šių parametų dydžiai Lietuvoje ir užsienyje.

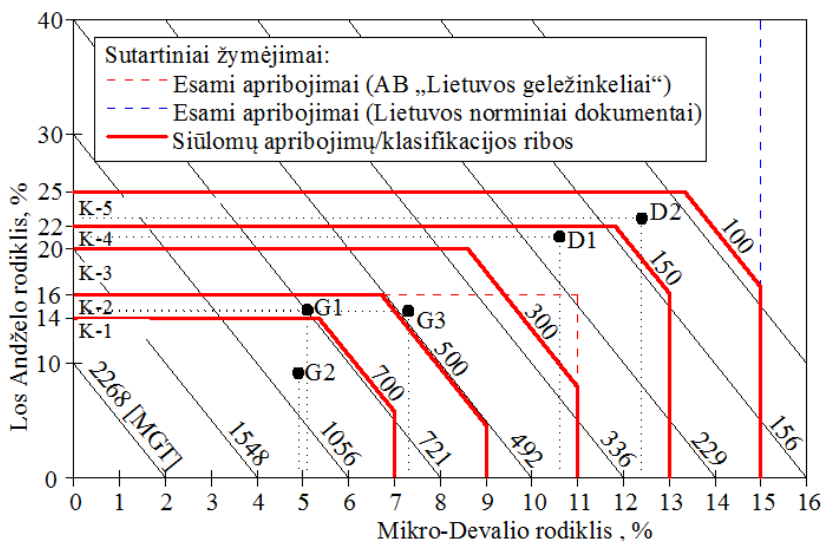
Siūlomos Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikacijos, kai pabėgiai mediniai ir kai pabėgiai gelžbetoniniai, pateikiamos atitinkamai 3.15 ir 3.16 paveiksluose.

Rekomenduojamos apribojimų ribos neviršija šiuo metu Lietuvos norminiuose dokumentuose nurodomų leistinų dydžių ($M_{DE} \leq 15\%$). AB „Lietuvos geležinkeliai“ nustatytos ribos ($LA_{RB} \leq 16\%$; $M_{DE} \leq 11\%$) apima balasto mechaninių savybių kategorijas K-1, K-2 ir dalinai K-3, kurioms pagal 3.4 lentelę priklauso greitkeliai, intensyvaus eismo bei I – III geležinkelio linijų kategorijos.



3.15 pav. Siūlomas Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikavimas, kai pabėgiai mediniai (taškai – laboratorijoje nustatytos savybių reikšmės)

Fig. 3.15. Classification of micro-Deval and Los Angeles indicators as sleepers are made of wood (points – laboratory detected characteristics values)



3.16 pav. Siūlomas Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikavimas, kai pabėgiai gelžbetoniniai (taškai – laboratorijoje nustatytos savybių reikšmės)

Fig. 3.16. Classification of micro-Deval and Los Angeles indicators as sleepers are made of concrete (points – laboratory detected characteristics values)

Siūlomas Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikavimas (paremtas ilgalaikiškumo skaičiavimais) skirsto medžiagas atsižvelgiant vien į jų mechanines savybes. Taip įtvirtinamos sąlygos ne tik granito, bet ir dolomito ar kitokių uolienų skaldų panaudojimui geležinkelio linijose, kuriose būna (ar numatoma, kad bus) nedideli metiniai eismo apkrovų intensyvumai (MEAI).

Mechaninių rodiklių grafinio klasifikacijos modelio naudojimosi pavyzdys:

Siūloma Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių grafinė klasifikacija (3.15–3.16 pav.) tai priemonė, kurią naudojant nustatoma, kokią balasto skaldos mechaninių savybių kategoriją (klasės pateiktos 3.4 lentelėje) atitinka nagrinėjama skalda. Grafinis modelis nėra priemonė tiksliai nustatyti prognozinį balasto skaldos ilgalaikiškumą, bet interpoliuojant galima gauti apytikslius rezultatus. Prognozinis balasto skaldos ilgalaikiškumas turi būti apskaičiuojamas kiekvienai medžiagai pagal BISM pateiktas formules.

Pavyzdžiui, imama D1 skalda. Jos Los Andželo ir mikro-Devalio rodikliai atitinkamai yra 21,1 % ir 10,6 % (2.2 lentelė). Taškas D1 pažymėtas 3.16 paveiksle, o į Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių vertes žyminčias ašis nubrėžtos punktyrinės linijos. Taškas D1 yra beveik viduryje tarp pasvirųjų linijų, žyminčių 156 MGT ir 229 MGT prognozinį ilgalaikiškumą. Tai reiškia, kad D1 skaldos ilgalaikiškumas apytiksliai lygus $156 + (229 - 156) = 193$ MGT. Pagal tiks-

lius paskaičiavimus (3.3 lentelė) D1 skaldos ilgalaikiškumo rodiklis yra 196 MGT.

3.16 paveiksle taškas D1 patenka į K-4 mechaninių savybių kategorijos zoną. 3.4 lentelėje nurodoma, kokiose geležinkelio linijose balastas gali būti įrengiamas panaudojant šią medžiagą ir kokie didžiausi traukinių eismo apkrovų intensyvumai jose gali būti. Tačiau priimant sprendimą būtina įvertinti laikotarpį, kuriam numatoma eksploatuoti skaldos balastą.

3.3. Balasto mechaninių savybių rodiklių klasifikavimo ekonominės naudos analizė

Balasto skaldos ilgalaikiškumo skaičiavimų rezultatai rodo balasto ilgalaikiškumą idealiomis eksploatacinėmis sąlygomis – skaičiavimo modelyje priimama, kad nėra taršos iš pobalastinio sluoksnio ir žemės sankasos bei kitų išorinių šaltinių. Kaip minėta, 76 % balasto taršos atsiranda dėl jo paties degradacijos (Selig and Waters 1994), todėl galima apskaičiuotą prognozinį ilgalaikiškumą mažinti 24 % taip įvertinant taršą iš pobalastinio sluoksnio ir žemės sankasos bei kitų išorinių šaltinių.

Čia būtina priminti, kad modelyje nėra įvertinta balasto degradacija dėl balasto plukimo, atliekamo kelio priežiūros ar einamojo remonto metu. Plukant balastą pastarasis degraduoja daug greičiau, o realus ilgalaikiškumas labai priklauso nuo balasto plukimo (kelio pamušimo) kartų. Be to, balasto tarša iš išorės ar tarša dėl sankasos gruntų skverbimosi gali kisti. Pavyzdžiui, tarša iš išorinių šaltinių stoties keliuose gali būti gerokai didesnė, o gruntų skverbimasis gali būti stabdomas sankasos įrengimui naudojant geotekstilę.

Balasto mechaninių rodiklių klasifikavimo ekonominio efekto vertinimui pasirinktas atvejis, kai viršutinė kelio konstrukcija įrengiama ant gelžbetoninių pabėgių. Prognozuojamas ilgalaikiškumas $L_{G/B}$, apskaičiuotas įvertinant išorinę taršą, pateiktas 3.5 lentelėje. Joje nurodytos bandymams naudotų skaldų koduotės: D1, D2 – dolomito skaldos; G1, G2, G3 – granito skaldos.

Medžiagų kainos nustatytos pagal 2014–2015 metų duomenis. Dolomito skaldos kainos nustatytos apklausus tiekėjus, nes dėl nusistovėjusios praktikos AB „Lietuvos geležinkeliai“ konkursų sąlygose nurodo, kad skalda turi būti granitinė. Granitinės skaldos kainos nustatytos atsižvelgiant į viešųjų pirkimų konkursų nugalėtojų pasiūlytas kainas. Visos kainos skirstomos atsižvelgiant į regionus: Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Šiaulių.

3.5 lentelėje pateikiamos apskaičiuotos kainos balasto medžiagos kiekiui, kurio reikia naujai pastatyti 1 km geležinkelio kelio. Skaičiuojant balasto kiekį priimamos šios sąlygos:

- naudojami gelžbetoniniai pabėgiai, kurių ilgis 2700 mm, plotis 300 mm, įgilinimas į balastą 145 mm;
- balasto prizmės aukštis iki pabėgio apačios 350 mm;
- balasto prizmės viršaus ir apačios pločiai atitinkamai 3600 ir 5100 mm;
- pabėgių epiūra (pabėgių skaičius/1 km kelio) 1840;
- skaldos sutankinimo koeficientas 1,17;
- skaldos piltinis tankis (priimamas visoms nagrinėtoms skaldoms) $1,35 \text{ t/m}^3$.

Įvertinus minėtas sąlygas, gaunama, kad 1-am km naujai statomo kelio reikalingas 31,5/63 mm frakcijos skaldos kiekis yra 2292 m³, kurio masė siekia 3094 t. Naudojant šią masės vertę paskaičiuotos ir 3.5 lentelėje pateiktos medžiagos kainos tūkstančiais EUR/km naujai statomo kelio atskirai kiekvienam regionui.

Lentelės apačioje pateikiami kainų skirtumai procentais, kurie rodo, kiek granito skaldos yra brangesnės už dolomito skaldas. Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos regionuose kainos skiriasi 41–59 %, tačiau Šiaulių regione granito skalda yra net 123 % brangesnė nei dolomito skalda. Pastarąją naudojant galima sutautyti apie 34000 EUR 1-am kilometrui naujai statomo geležinkelio kelio.

3.5 lentelė. Balasto skaldos kainų analizė

Table 3.5. Price analysis of the ballast aggregates

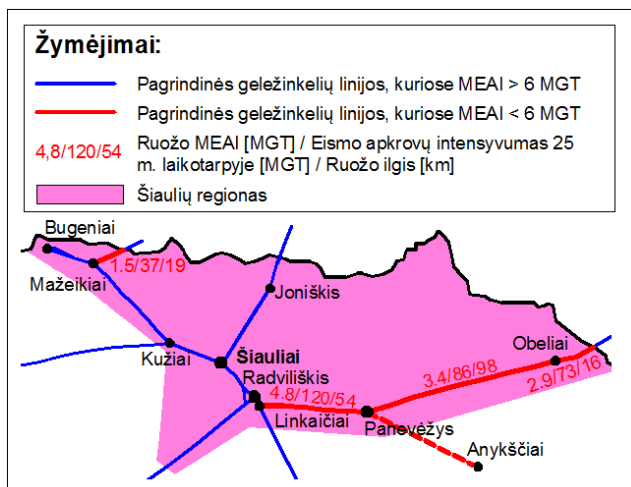
Medžiaga	Prognozuojamas ilgalaikiškumas L_{GB} , įvertinant išorinę taršą, MGT	Medžiagos kaina (2014–2015 m.m.), EUR/t				Medžiagos kaina (2014–2015 m.m.), tūkst. EUR/1 km naujai statomo kelio			
		Regionas							
		Vilnius	Kaunas	Klaipėda	Šiauliai	Vilnius	Kaunas	Klaipėda	Šiauliai
D1	149	14,90	14,85	14,80	9,00	46	46	46	28
D2	99								
G1	544	21,60	20,87	23,52	20,05	67	65	73	62
G2	697								
G3	359								
Kainų skirtumas, %		45	41	59	123				

Priimant, kad 1-o km naujai įrengiamos geležinkelio kelio viršutinės konstrukcijos kaina yra 330000 EUR plus balasto kaina, gaunama, jog Šiaulių regione naudojant dolomito skaldą mažo eismo apkrovų intensyvumo keliams statyti galima sutaupyti apie 8,7 % viršutinės kelio konstrukcijos įrengimo kainos. Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos regionuose sutaupyti galima atitinkamai po 5,3 %, 4,8 % ir 6,7 % viršutinės kelio konstrukcijos įrengimo kainos.

Pagal 3.16 paveiksle pateiktą siūlomą mechaninių savybių rodiklių klasifikaciją, dolomito skalda turėtų atlaikyti iki 300 MGT prognozes eismo apkrovas (retais atvejais daugiau). Įvertinus taršą iš pobalastinio sluoksnio ir žemės sankasos bei kitų išorinių šaltinių šis skaičius siekia 228 MGT, o tai yra maždaug 9 MGT per metus 25 metų laikotarpyje.

Skaldai D1 apskaičiuotas 196 MGT ilgalaikiškumas įvertinus taršą iš išorinių šaltinių siek 149 MGT. Todėl galima teigti, kad per 25 metus ji gali atlaikyti iki 6 MGT metinį eismo apkrovų intensyvumą (MEAI).

D priede pateikiamas paveikslas, kuriame vaizduojamos Lietuvos Respublikos teritorijoje schematiškai įbrėžtos pagrindinės geležinkelio linijos ir pagrindinės stotys. Kelių ruožams, kuriuose metinis eismo apkrovų intensyvumas (MEAI) mažesnis nei 6 MGT, nurodyti apskaičiuotieji MEAI, 25 metų laikotarpio eismo apkrovų intensyvumas (suminis) bei to ruožo ilgiai. Šie keliai pažymėti raudonai. 3.17 paveiksle pateikiami analogiški duomenys, bet tik Šiaulių regionui, kuriame dolomito skaldos kaina yra mažiausia.



3.17 pav. Šiaulių regiono pagrindinės geležinkelio linijos

Fig. 3.17. The main railway lines in Šiaulių region

Šiaulių regione bendras ilgis geležinkelių, kuriuose $MEAI < 6$ MGT per metus, siekia 187 km. Ir tai tik pagrindinės linijos. Čia neįvertinami visų regioninių linijų, privažiuojamųjų ir stoties kelių ilgiai. Bet vien šioms linijoms rekonstruoti prireiktų apie 578 tūkst. tonų skaldos ir pasirinkus dolomito skaldą būtų galima sutaupyti apie 6,36 mln. EUR (vertinant šių dienų kainomis).

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Balasto savybių vertinimas jų skaitines vertes lyginant su norminiuose dokumentuose pateikiamais reikalavimais parodė, kad dalis Lietuvoje taikomų reikalavimų yra labai neracionalūs. Įvertinus laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatus ir užsienio valstybėse taikomus reikalavimus balastui, rekomenduojama geležinkelio balastui Lietuvos norminiuose dokumentuose nurodyti tokias leistinas savybių reikšmes:

- | | |
|--|---|
| • Granuliometrijos kategorija $G_{C RB}$ | C; |
| • Smulkiosios dalelės $G_{F RB}$ | $\leq 1,0$ %; |
| • Mineralinės dulkės f_{RB} | $\leq 1,0$ %; |
| • Plokštumo rodiklis Fl_{RB} | ≤ 20 %; |
| • Dalelių formos rodiklis SI_{RB} | 5–30 %; |
| • Dalelių ilgio rodiklis L_{RB} | ≤ 6 %; |
| • Tankis ρ_{cm} | Dolomitas: $\geq 2,65$ t/m ³ ;
Granitas: $\geq 2,60$ t/m ³ ; |
| • Įmirkis W_{cm} | Dolomitas: $\leq 1,5$ %;
Granitas: $\leq 0,5$ %; |
| • Atsparumo smūgiams rodiklis SZ_{RB} | Dolomitas: ≤ 25 %;
Granitas: ≤ 22 %; |
| • Atsparumas šaldymui ir šildymui F_{RB} | $\leq 1,0$ %. |

2. Balasto ilgalaikiškumas nustatytas pagal BISM. Panaudojus laboratorijoje nustatytus mineralinių skaldų mechaninių savybių rodiklius, apskaičiuotas kompleksinis dėvėjimosi rodiklis N_A ir balasto prognozinis ilgalaikiškumas L_M bei L_{GB} (atitinkamai mediniams ir gelžbetoniniams pabėgiams). Apskaičiuotas kompleksinis dėvėjimosi rodiklis N_A skyrėsi 151,3 %: kito nuo 33,7 % (granito skalda) iki 84,7 % (dolomito skalda). Nustatyta, kad priklausomai nuo mechaninių rodiklių, ilgalaikiškumas skirtingoms medžiagoms gali skirtis net 7 kartus.
3. Sudaryti grafiniai modeliai, kuriuos rekomenduojama naudoti Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikavimui (išskirtos 5-ios

kategorijos). Klasifikavimas leidžia nustatyti, kuriose geležinkelio linijose skalda yra tinkama balasto sluoksniui įrengti.

4. Siūlomas Los Andželo rodiklio (atsparumas trupinimui) ir mikro-Devalio rodiklio (atsparumas dėvėjimuisi) verčių klasifikavimas, pagrįstas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimais, skirsto medžiagas atsižvelgiant vien į jų mechanines savybes. Toks klasifikavimas leidžia mažiau patvarias medžiagas panaudoti geležinkelio linijose, kuriose traukinių eismo apkrovų intensyvumai yra ne didesni nei 6 mln. t bruto per metus.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinių darbų ir norminių dokumentų analizę nustatyta:
 - Lietuvos norminiuose dokumentuose nenumatytos galimybės balastui naudoti skaldas, kurių mikro-Devalio rodiklio (M_{DE}) reikšmės mažesnės nei 15 %.
 - Balasto skaldos taršą labiausiai didinantis veiksnys yra balasto dalelių smulkėjimas, kuris sudaro apie 76 % balasto taršos. Likusią taršos dalį sudaro: pobalastinio sluoksnio skverbimasis (13 %), išorinė tarša (7 %), žemės sankasos gruntų skverbimasis (3 %) ir pabėgių trupėjimas (1 %).
 - Labai reikšminga balasto dalelių degradacija vyksta kelio ištaisymo darbų metu – balaste vieno plūkimo ciklo metu ties vienu pabėgiu susidaro 0,12 – 0,24 % (nuo visos balasto masės) dalelių, smulkesnių nei 14 mm.
 - Balasto medžiagos dalelių tvirtumo ir kietumo rodikliai tiesiogiai daro įtaką bėgių kelio (balasto prizmės) ilgalaikiškumui. Degradacija eksploatacijos metu nėra linijinė.
2. Sudaryta Balasto skaldos parinkimo metodika (BSPM), kurioje įvertinamos fizinės ir mechaninės medžiagų savybės bei perspektyvinės traukinių eismo apkrovos. Balasto skaldos atsparumas trupinimui ir atsparumas dėvėjimuisi įvertinami kompleksiniu dėvėjimosi rodikliu N_A , kuris naudojamas balasto ilgalaikiškumo skaičiavimams atlikti pagal sudarytą Balasto ilgalaikiškumo skaičiavimo metodiką (BISM). Suformuoti grafiniai modeliai, kuriuos rekomen-

duojama naudoti Los Andželo ir mikro-Devalio rodiklių klasifikavimui ir leistinų verčių reglamentavimui. Klasifikavimas leidžia skirstyti mechanines savybes į 5-ias kategorijas bei nustatyti, kuriose geležinkelio linijose skalda yra tinkama balasto sluoksniui įrengti.

3. Balasto skaldos kokybę norminiuose dokumentuose iki šiol numatyta vertinti tik pagal dvi savybes: granulometrijos kategoriją ir atsparumą dėvėjimuisi. Šių dviejų savybių nepakanka skaldos kokybei nustatyti, todėl įvertinus laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatus ir užsienio valstybėse taikomus reikalavimus balasto skaldai, pasiūlytos leistinos fizinių (granulometrijos kategorija; smulkiųjų dalelių ir mineralinių dulkių kiekiai; plokštumo, formos, dalelių ilgio bei atsparumo šaldymui ir šildymui rodikliai, tankis, įmirkis) ir mechaninių (atsparumo trupinimui, smūgiams ir dėvėjimuisi rodikliai) savybių vertės, kurias rekomenduojama taikyti geležinkelio balasto savybes normuojančiuose dokumentuose.

4. Lietuvoje yra apie 580 km geležinkelio kelių (nevertinant privažiuojamųjų kelių), kuriuose metinis eismo apkrovų intensyvumas nesiekia 6 MGT. Balasto skaldos ilgalaikiškumo skaičiavimais nustatyta, kad šiuose keliuose gali būti naudojama dolomitinė skalda D1.

5. 31,5/63 mm frakcijos granitinė skalda yra tinkamiausia naudoti geležinkelio balastui įrengti linijose, kur eismo apkrovų intensyvumas didesnis nei 6 MGT per metus. Tačiau disertacijoje pateikiami ilgalaikiškumo skaičiavimų rezultatai rodo, kad priklausomai nuo mechaninių savybių granito skaldos ilgalaikiškumas gali skirtis dvigubai – granito skalda G2 gali atlaikyti 94 % daugiau eismo apkrovų nei granito skalda G3. Be to, vienodos kilmės uolienų skaldos kietumo ir tvirtumo rodiklių vertės skiriasi iki 59,8 %. Todėl parenkant skalda balastui įrengti netikslinga vertinti uolienos kilmės, bet būtina nustatyti skaldos mechanines savybes: atsparumą trupinimui (Los Andželo metodu) ir atsparumą dėvėjimuisi (mikro-Devalio metodu). Šių savybių rodikliai tiesiogiai daro įtaką kompleksiniam dėvėjimosi rodikliui N_A .

6. Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos regionuose granito ir dolomito skaldų kainos skiriasi 41–59 %, tačiau Šiaulių regione granito skalda yra net 123 % brangesnė nei dolomito skalda. Pastarąją naudojant galima sutaupyti apie 34000 EUR 1-am kilometrui geležinkelio kelio naujai pastatyti. Šiaulių regione naudojant dolomito skalda mažo eismo apkrovų intensyvumo keliams statyti galima sutaupyti apie 8,7 % viršutinės kelio konstrukcijos įrengimo kainos. Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos regionuose sutaupyti galima atitinkamai po 5,3 %, 4,8 % ir 6,7 % viršutinės kelio konstrukcijos įrengimo kainos.

Literatūra ir šaltiniai

255/K. *Sugretintų vėžių kelio tiesimo ir priežiūros instrukcija (1435 mm ir 1520 mm pločio vėžės)*. Vilnius: SPAB „Lietuvos geležinkeliai“.

256/K. *Sugretintų vėžių kelio tiesimo ir priežiūros normų aprašas (1435 mm ir 1520 mm pločio sugretintų vėžių bei 1435 mm vėžės)*. Vilnius: SPAB „Lietuvos geležinkeliai“.

ADV/001. *Techninio geležinkelių naudojimo nuostatai*. Vilnius: SPAB „Lietuvos geležinkeliai“.

Al-Qadi, I. L.; Xie, W.; Jones, D. L.; Roberts, R. 2010. Development of a time–frequency approach to quantify railroad ballast fouling condition using ultra-wide band ground-penetrating radar data, *International Journal of Pavement Engineering*, 11(4): 269–279.

Andrade, A. R. 2008. Renewal decisions from a Life-cycle Cost (LCC) Perspective in Railway Infrastructure: An integrative approach using separate LCC models for rail and ballast components. PhD thesis, Technical University of Lisbon. Portugal.

Andrade, A. R.; Texeira, F. P. 2011. Bo-objective optimization model for maintenance and renewal decisions related to rail track geometry, *J Transport Res Record*, Vol. 2261:163–170.

AREMA. *Manual for Railway Engineering*. 2010. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. ISSN 1542-8036.

Arasteh Khouy, I.; Schunnesson, H.; Juntti, U.; Nissen, A.; Larsson-Kraik, P. 2014. Evaluation of track geometry maintenance for a heavy haul railroad in Sweden: a case study, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(5): 496–503.

AS 2758.7-2009. *Aggregate for the Railway Ballast*. The Requirements. Australija.

ASTM D6928-10. 2010. *Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus*, ASTM International.

Augustin, S.; Gudehus, G.; Huber, G. *et al.* 2003. Numerical model and laboratory test on settlement of ballast track, *System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles*. Springer.

Aursudkij, B. 2007. A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance. PhD thesis. University of Nottingham. UK.

Aursudkij, B.; McDowell, G. R.; Collop, A. C. 2009. Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility. *Granular Matter*. 11:391–401.

Brown, S. F.; Brodrick, B. V.; Thom, N. H.; McDowell, G. R. 2004. The Nottingham Railway Test Facility. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*. UK.

Burks, M. E.; Robson, J. D.; Shenton, M. J. 1975. Comparison of Robel supermat and Plasser 07-16 track maintenance machines. *Tech. Note TN SN 139, British Railways Board R&D division*, UK.

Caetano, L. F.; Texeira, P. F. 2015. Optimisation model to schedule railway track renewal operations: a life-cycle cost approach, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(11): 1524–1536.

Chen, C.; McDowell, G. R.; Thom, N. H. 2013. A study of geogrid-reinforced ballast using laboratory pull-out tests and discrete element modelling, *Geomechanics and Geoengineering*, 8(4): 244–253.

Chrismer, S. M., Selig, E. T., Laine, K., and DelloRusso, V. 1991. Ballast durability test at Sibley, Missouri. *Association of American Railroads, Chicago, Illinois, Report* No. R-801.

DBS 918 061. 2006. *DB-Standard. Technische Lieferbedingungen. Gleisschotter*. Vokietija.

Eickhof, B.; Mazzola, L.; Bezin, Y. *et al.* 2015. Track loading limits and cross-acceptance of vehicle approvals, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 229(6): 710–728.

Eisenmann, J. 1976. The significance of the rail lifting wave, *Rail International*, 10: 576–581.

Esveld, C. 2001. *Modern Railway Track, (Second Edition)*, MRT-Productions, Zaltbommel, ISBN 90-8004-324-3-3.

ETA-04-01. 2005. *Engineering (Track & Civil) Standard. Ballast Specification*. ARTC. Australija.

Famurewa, S. M.; Xin, T.; Rantatalo, M.; Kumar, U. 2015. Optimisation of maintenance track possession time: A tamping case study, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 229(1): 12–22.

Feldman, F.; Nissen, D. 2002. Alternative Testing Method for the Measurement of Ballast Fouling : Percentage Void Contamination. *CORE 2002: Cost Efficient Railways through Engineering*. Wollongong, N.S.W.: Railway Technical Society of Australasia/Rail Track Association of Australia, 101–111. Prieiga per internetą: <<http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=303805891788837;res=IELENG>> ISBN: 0858258250 [žiūrėta 2015 m sausio 17 d.].

Feng, D. M. 1984. Railroad ballast performance evaluation. *Report No. AAR84-311P*, Department of Civil Engineering, University of Massachusetts, Amherst, US.

Gasiūnienė, V. E. 2009. Lietuvos naudingųjų iškasenų išteklių būklė ir jų gavybos statistika (santrauka), *Lietuvos žaliųjų judėjimo seminaras „Naudingųjų iškasenų gavyba: nauda ir problemas“*, 1–13.

Gaskin P. N. and Raymond G. P. 1976. Contribution to Selection of Railroad Ballast. *Journal of the Transportation Engineering Devision*, ESCE, Vol. 102, TE2:377–394.

Griffin, D. W. P.; Mirza, O.; Kwok, K.; Kaewunruen, S. 2014. Composite slabs for railway construction and maintenance: a mechanistic review, *The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, 7(4): 243–262.

GOST 7392-85. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия.

GOST 7394-85. Балласт гравийный и гравийно – песчаный для железнодорожного пути. Технические условия.

GOST 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

Holmes, W. A. 1971. Ballast failure – Duffield. *British Railway Report*, UK.

Huang, H.; Tutumluer, E. 2014. Image-aided element shape generation method in discrete-element modeling for railroad ballast, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(3): 527–535.

Ionescu D. 2005. Ballast degradation and measurement of ballast fouling. *Eurailpress*, Hamburg. 12–18.

IST 1005384-2:2011. 1520 mm vėžės pločio geležinkelio linijos viršutinė kelio konstrukcija, kai keleivinių traukinių važiavimo greitis iki 160 km/h. Techniniai reikalavimai. Leidimas 2. Įmonės AB „Lietuvos geležinkeliai“ standartas. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statinių konstrukcijų ir medžiagų mokslo laboratorija.

- Yan, Y.; Zhao, J.; Ji, S. 2015. Discrete element analysis of breakage of irregularly shaped railway ballast, *Geomechanics and Geoengineering*, 10(1): 1–9.
- Yang, L. A.; Powrie, W.; Priest, J. A. 2009. Dynamic stress analysis of a blasted railway track bed during train passage, *J Geotech Geoenviron Engng*, Vol. 135(5): 680–689.
- Johnson, D. M. 1982. A reappraisal of the BR ballast specification. *British Rail Research Technical Memorandum*, TM TD 1, UK.
- Johnson, D. M. 1985. Investigation of practical ballast specification requirements. *Report No. WP-114*, Association of American Railroads, US.
- K/111. 2000. *Geležinkelio kelio priežiūros taisyklės*. Vilnius: SPAB „Lietuvos geležinkeliai“ Leidybos centras.
- Kabo, E. 2006. A numerical study of the lateral ballast resistance in railway tracks, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 220: 425–433.
- Klassen, M. J., Clifton, A. W., Waters, B. R. 1987. Track Evaluation and Ballast Performance Specifications, *Performance of Aggregates in Railroads and Other Track Performance Issues: Transportation Research Record*, 1131. 35–44. Transportation Research Board, Washington, DC, US.
- Klotzinger E. 2008a. Der Oberbauschotter T1.1: Anforderungen und Beanspruchung. Eisenbahntechnische Rundschau, ½: 34–41. Vokietija.
- Klotzinger E. 2008b. Der Oberbauschotter T1.2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen. Eisenbahntechnische Rundschau, ½, 120–125. Vokietija.
- Kuttelwascher C.; Zuzic, M. 2012. Track ballast in Austria. Part 1, 2 and 3. *Rail Infrastructure*, 88–90, [žiūrėta 2014 m rugsėjo 10 d.]. Prieiga per internetą: http://www.plasserthurer.com/pdf/publications/ri_12888990.pdf
- Kuula-Väisänen, P., Kaivola, T-M. 2002. Technical Requirements for Railway Ballast in Finland. *9th Nordic Aggregate Research Conference*, 1–3. Reykjavik, Iceland.
- Lackenby, J. 2006. Triaxial behavior of ballast and the role of confining pressure under cyclic loading. PhD thesis, University of Wollongong. Australia.
- Larrson, D. 2004. A Study of the Track Degradation Process Related to Changes in Railway Traffic. PhD thesis, Luleå University of Technology. Sweden. ISSN: 1402-1757.
- Le Pen, L. M.; Powrie, W. 2010. Contribution of base, crib and shoulder ballast to the lateral sliding resistance of railway track: A geotechnical perspective, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 225: 113–128.
- Lim, W. L. 2004. Mechanics of Railway Ballast Behaviour. PhD thesis. University of Nottingham, UK.
- LST EN 933-1:2012. Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. *Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas*.

LST EN 933-3:2012. Užpildų geometrinų savybių nustatymo metodai. 3 dalis. *Dalelių formos nustatymas. Plokštumo rodiklis.*

LST EN 933-4:2008. Užpildų geometrinų savybių nustatymo metodai. 4 dalis. *Dalelių formos nustatymas. Formos rodiklis.*

LST EN 1097-1:2011. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. *Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (mikro-Devalio metodas).*

LST EN 1097-2:2010. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 2 dalis. *Atsparumo trupinimui nustatymo metodai.*

LST EN 1097-6:2013. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 6 dalis. *Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas.*

LST EN 1367-1:2007. Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 1 dalis. *Atsparumo šaldymui ir atšildymui nustatymas.*

LST EN 1367-2:2010. Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 2 dalis. *Magnio sulfato metodas.*

LST EN 13450:2003. Lietuvos standartas. Geležinkelio balasto mineralinės medžiagos.

LST EN 13450:2013. Lietuvos standartas. Geležinkelio balasto mineralinės medžiagos.

Lu, M. 2008. Discrete Element Modeling of Railway Ballast. PhD thesis, University of Nottingham. UK.

McIntyre, A., Plitt, L. R. 1980. The Inter-Relationship Between Bond and Hardgrove Grindabilities, *Canadian Inst. of Mining and Metallurgy Bulletin* 63, 149–180. Canada.

Mandal, N. K.; Dhanasekar, M.; Sun, Y. Q. *et al.* 2016. Impact forces at dipped rail joints, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 230(1): 271–282.

Maskeliūnaitė, L.; Sivilevičius, H. 2012. Expert evaluation of criteria describing the quality of travelling by international passenger train: Technological, economic and safety perspectives, *Technological and Economic Development of Economy*, 18(3): 544–566. DOI: 10.3846/20294913.2012.710178.

Nacionalinė susisiekimo plėtros 2014–2022 metų programa. *Lietuvos Respublika. 2013 m. gruodžio 18 d., nutarimas Nr. 1253*, 21 p.

Navikas, D.; Bulevičius, M.; Sivilevičius, H. 2016. Determination and evaluation of railway aggregate sub-ballast gradation and other properties variation, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22:5, 699–710, DOI: 10.3846/13923730.2016.1177586.

Nurmikolu, A. 2005. Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track. PhD thesis, Tampere University of Technology. Publication 567. Finland.

ORDEN FOM/1269/2006. *Balasto y Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF)*. Ispanija.

Oregui, M.; Li, Z.; Dollevoet, R. 2016. An investigation into the vertical dynamics of tracks with monoblock sleepers with a 3D finite-element model, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 230(3): 891–908.

Plati, C.; Loizos, A.; Papavasiliou, V. 2010. Inspection of railroad ballast using geophysical method, *International Journal of Pavement Engineering*, 11(4): 309–317.

Raymond, G. P. 1977. Stresses and deformations in railway track. *CIGGT Report No. 22*: 77–115, UK.

Raymond, G. P.; Dyaljee, V. A. 1979. Railroad Ballast Ranking Classification. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, GT 10:133–153, New York, US.

Raymond, G. P. 1985. Research on Railroad Ballast Specification and Evaluation. *Track Design and Construction: Transportation Research Record*, 1006, 1–8, US.

Richtlinienfamilie 820. 2008. Grundlagen des Oberbaues. *Regelwerk Oberbau*. Vokietija.

Sadeghi, J.; Askarinejad, H. 2012. Quality condition assessment and determination of effective maintenance activities in railway slab tracks, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(1): 1–10.

Selig, E. T., Collingwood B. I.; Field, S. W. 1988. Causes of Ballast fouling in track. *AREA Bulletin* 717, Volume 89, US.

Selig, E. T.; Boucher, D. L. 1990. Abrasion Tests for Railroad Ballast. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 13, No. 4, 301–311, US.

Selig, E. T.; DelloRusso, V. 1991. Sources and causes of ballast fouling, *American Railway Engineering Association*, Bulletin No. 731. Vol. 92, 145–157, US.

Selig, E. T.; Waters, J. 1994. Track geotechnology and substructure management. Derby.

Skrinskas, S.; Gasiūnienė, V. E.; Laurinavičius, A.; Podagėlis, I. 2010. Lithuanian Mineral Resources, Their Reserves and Possibilities for Their Usage in Road Building. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(4): 218–228.

SNip 32-01-95. 2012. Строительные нормы и правила. *Железные дороги колеи 1520 мм*, Москва.

Tennakoon, N.; Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C. 2014. Effect of ballast contamination on the behaviour of track substructure. *Australian Geomechanics Journal*, 49(4), 113–123.

Tutumluer, E.; Qian, Y.; Hashash, Y. M. A.; Ghaboussi, J.; Davis, D. D. 2013. Discrete element modelling of ballasted track deformation behaviour, *International Journal of Rail Transportation*, Vol. 1, no. 1-2, 57–73.

Vale, C.; Ribeiro, I. M. 2014. Railway condition-based maintenance model with stochastic deterioration, *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5): 686–692.

Vaitkus, A.; Šiukščius, A.; Ramūnas, V. 2014. Regulations for use of geosynthetics for road embankments and subgrades. *The Baltic journal of road and bridge engineering*. Vol. 9, no. 2, 88–93. ISSN 1822-427X.

Varandas, J. N.; Holcher, P.; Silva, M. A. G. 2014. Settlement of ballasted track under traffic loading: Application to transition zones, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 228(3): 242–259.

Villarejo, R.; Johanson, C.; Galar, D.; Sandborn, P.; Kumar, U. 2016. Context-driven decisions for railway maintenance, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 230(5): 1469–1483.

Waters, J. M. 1974. A review of the work of the soil mechanics section, December 1972–1973. *British Railways Board, R&D Division, Technical Memorandum SM7*, UK.

Wright, S. E. 1983. Damage caused by mechanical maintenance techniques. *British rail research technical memorandum TM TD 15*, UK.

Zakeri, J. A. 2012. Lateral Resistance of Railway Track, *Reliability and Safety in Railway*, 357–374. ISBN: 978-953-51-0451-3.

Zakeri, J. A.; Esmaili, M.; Kasraei, A.; Bakhtiary, A. 2016. Track loading limits and cross-acceptance of vehicle approvals, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol. 230(2): 440–449.

Zakeri, J. A.; Mirfattahi, B.; Fakhari, M. 2012. Lateral resistance of railway track with frictional sleepers, *Proc Inst Civil Engng*, Vol. 165: 151–155.

Zhang, Y. J., Murray, M. H.; Ferreira, L. 2000. Modelling Rail Track Performance: An Integrated Approach., *Transport Journal*, 187–194.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Ramūnas, V. 2013. Geležinkelio skaldos balasto prizmės funkcijos ir jai keliami reikalavimai, *Jaunųjų mokslininkų darbai = Journal of young scientists*. 1(39): 168–174. ISSN 1648-8776.

Vaitkus, A.; Šiukščius, A.; Ramūnas, V. 2014. Regulations for use of geosynthetics for road embankments and subgrades, *The Baltic journal of road and bridge engineering*. 9(2): 88–93. ISSN 1822-427X. (*Science Citation Index Expanded (Web of Science)*); *Citav. rod.: 0,766(F)*.

Vitkienė, J.; Ramūnas, V.; Tumavičė, A. 2016. Визуальная оценка качества проектных решений в продольном профиле автомобильных дорог, *Автомобильные дороги и мосты*. 1(17): 67–71. ISSN 2225-9082.

Straipsniai kituose leidiniuose

Ramunas, V.; Gailienė, I.; Podagėlis, I. 2011. Increment of railway line capacity, in *proceedings of 8th International Conference "Environmental Engineering"*. Vilnius: Technika, 1193–1199. ISBN 9789955288312.

Gailienė, I.; Ramūnas, V.; Skerys, K. 2012. Accidents at the level crossings in Lithuanian railways, in *CETRA 2012 'proceedings of the 2nd international conference on road*

and rail infrastructures. Zagreb: University of Zagreb, 1139–1145. ISBN 9789536272501.

Ramūnas, V.; Gailienė, I.; Laurinavičius, A. 2014. Crushed rock ballast bed in the railway lines of Lithuania: analysis of the situation and arising problems, *in proceedings of 9th International Conference "Environmental Engineering"*. Vilnius: Technika, 1–8. ISBN 9786094576904.

Ramūnas, V.; Vaitkus, A.; Laurinavičius, A.; Čygas, D. 2016. Relationship between lifespan and mechanical performance of railway ballast, *in CETRA 2016' proceedings of the 4th international conference on road and rail infrastructures*. Zagreb: University of Zagreb, 659–665. ISSN 1848-9842.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

As the requirement for transportation which aims for highest quality, safety and lifespan increases, it is becoming increasingly important to correctly select the parameters for the railway superstructure when reconstructing existing railways or constructing new ones. The funding assigned to railway maintenance is very limited, therefore it is important to ensure the longest possible functioning time for every element of a railway.

The quality of the aggregate selected for the ballast prism of a railway influences the properties of the ballast prism and the functioning of the entire superstructure. When evaluating the eligibility of a mineral to be used for ballast prism, it must be determined whether the mineral satisfies all generalized requirements. However when the aim is to select the best crushed stone with regard to the expected train traffic loads on the railway, the mechanical properties of that crushed stone become most important. Taking into account the prospective train traffic loads on the railway line, the classification of mechanical property indicators is only possible if a relation between the mechanical properties and the lifespan of ballast is found. This type of classification allows selecting the ballast with the best mechanical properties while taking its lifespan into account.

The thesis contains: methodology for selecting crushed stone ballast, which evaluates the physical and mechanical properties of the ballast material, as well as train traffic loads; experimental research, during which tests were performed on crushed dolomite and crushed granite ballasts in a laboratory; the evaluation of physical and mechanical

properties found during research. With the goal of forming a classification of ballast mechanical property indicators, a set of ballast property permissible values was determined and proposed to be put into use in Lithuanian standard documents. According to the created methodology, the property values of laboratory tested crushed stone are evaluated.

Relevance of the thesis

Price, granulometric category and resistance to wearing (according to micro-Deval indicator) are commonly evaluated when selecting the material for railway ballast. However, it's not enough to determine one physical and one mechanical properties, because these alone do not reveal material's suitability for ballast. For this reason this thesis analyses the worldwide practice of selecting ballast material and its potential uses in Lithuania. The thesis also concerns performing the classification of the most important mechanical property indicators of ballast, which evaluates the prospective train traffic loads on a railway. A ballast crushed stone selection methodology (further – BCSSM) is created, which evaluates the physical and mechanical properties of a material and allows a more rational selection of materials when installing a ballast prism.

The classification is based on a model designed for ballast lifespan calculations, which links the Los Angeles indicator and micro-Deval indicator of a material with its lifespan. The model is expressed in a gross mass of loads given to railway track until the complete degradation of the ballast, when reconstruction becomes needed. When forming the primary model (used by CPR), sections of the road, where the ballast was affected by environmental factors and/or the ballast was polluted by external pollutants, were not taken into consideration.

The primary model was formed without taking into consideration the pollution of ballast due to small particles, which appear when lining sleepers i.e. tamping ballast under the sleepers during regular renovations, which take place when track rectification is needed. The ballast lifespan calculation model (referred to from now as BISM) is meant for Lithuanian conditions of exploitation. It is made for up to 25 tonne loads per axis, also taking into account the type of sleepers (wooden or concrete). The obtained results allow to calculate the lifespan of the ballast, and, when comparing different ballast material lifespan indicators, to select the most appropriate material.

Research object

The object of research is the physical and mechanical properties of crushed stone and the influence of these properties on the lifespan of ballast. Five ballasts were used for research: two dolomite and three granite.

Aim of the thesis

Aim of the thesis is to provide a scientifically based crushed stone selection methodology which evaluates the physical and mechanical properties of the material, as well as prospective train traffic loads.

Objectives of the thesis

The following tasks have to be solved to achieve the aim of the work:

1. Form the methodology for evaluation of the physical and mechanical properties of a railroad ballast crushed stone.
2. Use laboratory testing to examine the physical and mechanical properties of granite and dolomite crushed stone.
3. Form a ballast lifespan calculation methodology which evaluates its mechanical properties.
4. Form a classification for the Los Angeles and micro-Deval indicators of crushed stone ballast, provide recommendations for the limiting values of other characteristics.
5. Apply the formed ballast crushed stone selection methodology to evaluate the usage opportunities of granite and dolomite crushed stone.

Research methodology

The following research methods were used in the work: for determining the physical properties of crushed stone – methodologies for testing and determining the granulometric composition, amounts of fine particles and mineral dust, flakiness, shape and particle length indicators, density, water absorption and thermal properties; for determining the mechanical properties of crushed stone – methodologies for testing and determining the resistance to wearing (micro-Deval method), resistance to fragmentation (Los Angeles Abrasion method) and resistance to shock loading (Impact factor) indicators.

Scientific novelty of the thesis

Scientific novelty of the work is represented by the following novel results:

1. A crushed stone for ballast selection methodology, which evaluates the physical and mechanical properties, as well as prospective train traffic loads, was formed.
2. A lifespan calculation methodology, which evaluates the Los Angeles and micro-Deval indicators of a material, was formed for ballast.
3. A practical realization of the formed crushed stone ballast selection methodology is presented. The results of laboratory testing of the physical and mechanical properties of 5 ballasts were used for calculations and evaluation.
4. The recommended values of the physical and mechanical properties of dolomite and granite crushed stone ballasts are provided, the Los Angeles and micro-Deval indicators are classified by perspective train traffic loads.

Practical value of the research findings

1. The recommended values for the physical and mechanical properties of dolomite and granite crushed stone ballast are provided.
2. The formed crushed stone ballast selection methodology evaluates the physical and mechanical properties of a material, as well as prospective train traffic loads. The recommended value conformities of crushed stone properties are evaluated

using this methodology. Also, it is determined what level of train traffic loads is appropriate for certain crushed stone to be used for ballast.

3. The classification of the Los Angeles and micro-Deval indicators is substantiated by the calculations of ballast lifespan. This allows the use of less durable materials on railways which have train traffic load intensity up to 6 Million Gross Tonnes per year.

Defended statements

1. When evaluating the quality of ballast, it is necessary to determine the Los Angeles and micro-Deval indicator values of a crushed stone material.
2. The Los Angeles and micro-Deval indicators of crushed stone ballast require classification according to train traffic load intensities.
3. The regulation of crushed stone ballast physical and mechanical properties values limits affects the quality and lifespan of the railway superstructure.
4. The dolomite crushed stone is appropriate for ballast, as long as the prospective median annual train traffic load intensity is no larger than 6 Million Gross Tonnes.

Approval of the research findings

There are seven scientific articles published on the topic of this thesis: one in scientific journal included in the Thomson ISI Web of Science database, which has an impact factor (IF) (Vaitkus et al. 2014); three in "ISI Proceedings" database (Ramūnas et al. 2011; Gailienė et al. 2012; Ramūnas et al. 2014), three in scientific journals refereed in publications of other international databases (Ramūnas 2013; Ramūnas et al. 2016; Vitkienė et al. 2016).

On the topic of thesis five announcements have been read in the following scientific conferences in Lithuania and abroad:

- 8th International Conference „Environmental Engineering", 2011. Vilnius (Lithuania);
- 12th Conference of Young Scientists "Interdisciplinary researches on physical and technological sciences" – 2012“, 2012. Vilnius (Lithuania);
- 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure „CETRA 2012“, 2012. Dubrovnik (Croatia);
- 9th International Conference „Environmental Engineering", 2014. Vilnius (Lithuania);
- 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure „CETRA 2016“, 2016. Šibenik (Croatia).

The structure of the thesis

The scientific work consists of the introduction, 3 chapters, general conclusions, list of references, list of scientific publications on the topic of the thesis by the author and 6 annexes.

The total scope of the scientific work is 111 pages sans annexes. Text includes: 11 numbered formulae, 43 figures and 16 tables. 94 references were used in the dissertation.

Acknowledgements

I would like to express my very sincere appreciation to Prof Dr Alfredas Laurinavičius, my scientific supervisor, for his professional and consistent guidance, scientific consultations, valuable suggestions, optimistic encouragement and every possible assistance and patience during my doctoral studies and preparation of the dissertation. I would also like to thank Prof Dr Audrius Vaitkus for the very valuable scientific consultations, idea generation and constant optimism he gave. My thanks also to Assoc Prof Dr Viktoras Vorobjovas for his advice and suggestions when planning laboratory research. I express my gratitude to experts of the dissertation, Prof Dr Habil Henrikas Sivilevičius and Assoc Prof Dr Virgaudas Puodžiukas, who gave very valuable advices and insights.

My grateful thanks are also extended to my colleagues from the Road Department and Road Research Institute of Vilnius Gediminas Technical University for their cooperation, help and support, also to my family and friends for their support, patience and understanding during my doctoral studies.

1. Worldwide practice of railway ballast properties evaluation

The crushed stone ballast of a railway must satisfy every requirement for its physical and mechanical properties. These properties are determined through standardized laboratory testing. The values of these properties must be within the range of permissible values indicated in standardized documents. If the requirements for the properties of a material are not met, the material is deemed inappropriate for installing railway ballast with.

In compliancy with documents and practices applied in Lithuania, the crushed stone ballast selection methodology is very simplified (Fig. S1). Standardized documents provide only two essential requirements for crushed stone ballasts. However, when applying this methodology, the choice of the most appropriate crushed stone material is not ensured because other essential physical and mechanical properties of the material are not evaluated. Another problem is that in Lithuania the permissible values of property indicators are not regulated in standardized documents.

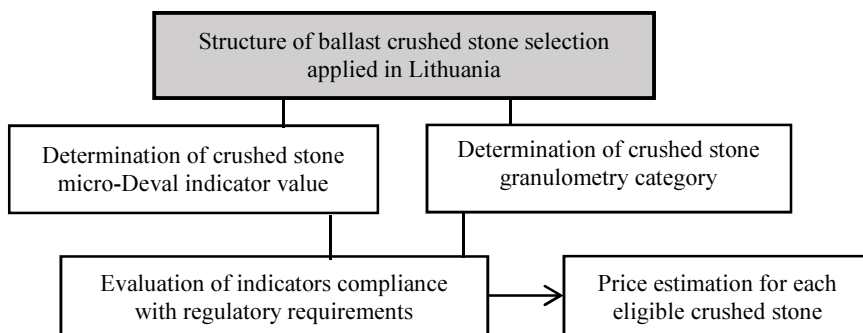


Fig. S1. Structure of ballast crushed stone selection methodology applied in Lithuania

For this reason it is important to analyze the standardized documents of various countries and the possibilities of applying the regulatory values in Lithuania. A new ballast crushed stone selection methodology structure needs to be formed, in which the lifespan of ballast and prospective train traffic loads are evaluated.

In Lithuanian standardized documents the possibility of using crushed stone with a micro-Deval indicator (M_{DE}) value of lower than 15% is not foreseen. This prevents from more cheaply installing ballast prisms in lower traffic intensity railway roads (ex. arrival roads of stations or loading driveways of various companies).

2. Formation of Ballast Crushed Stone Selection Methodology and the results of crushed stone properties testing

After evaluating the before mentioned worldwide and Lithuanian practices for crushed stone ballast evaluation and selection of most appropriate crushed stone, it is determinedly necessary to create a ballast crushed stone selection methodology (further – BCSSM) which evaluates all (or at least most) of the physical and mechanical properties of crushed stone to ensure a long lifespan of the ballast. Suggested BCSSM structure is provided in Fig. S2.

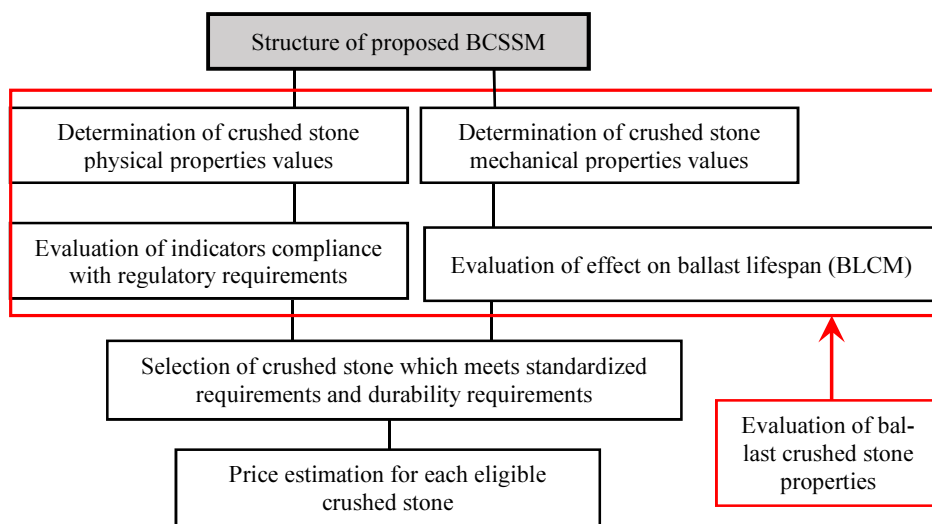


Fig. S2. The structure of proposed Ballast Crushed Stone Selection Methodology

In figure S2 the values of shown physical and mechanical properties are determined through standardized laboratory testing. Therefore it must be evaluated whether the physical properties satisfy the permissible values specified in the norms. As mentioned in the first chapter, the only physical property the norms specify is the permissible granulometric category.

Therefore, recommended permissible values of other physical properties will be offered in this work. To evaluate mechanical properties, their relation with the lifespan of

ballast must be found out. Then it must be determined under what prospective train traffic loads the crushed stone is appropriate for use when installing the ballast of a railway. Afterward, prices of selected (appropriate for use) materials are evaluated.

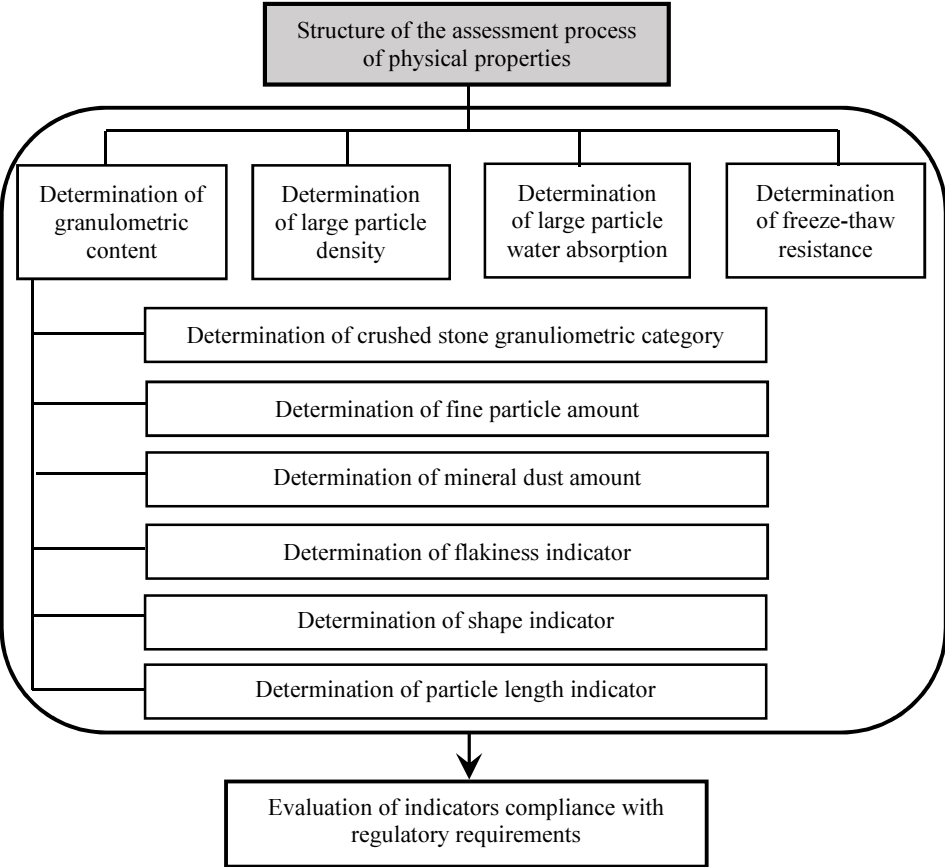


Fig. S3. The assessment process of physical properties

In figure S3 the structure of the process of physical quality evaluation is provided. It is comprised of two main parts: the determination of physical qualities in the laboratory by applying standardized research methods, and the evaluation of conformation to standardized documents.

In figure S4 the structure of the process of evaluating mechanical properties is provided. It shows that ballast lifespan must be evaluated according to the values of resistance to fragmentation and resistance to wearing. To do this, the ballast lifespan calculation methodology must be formed.

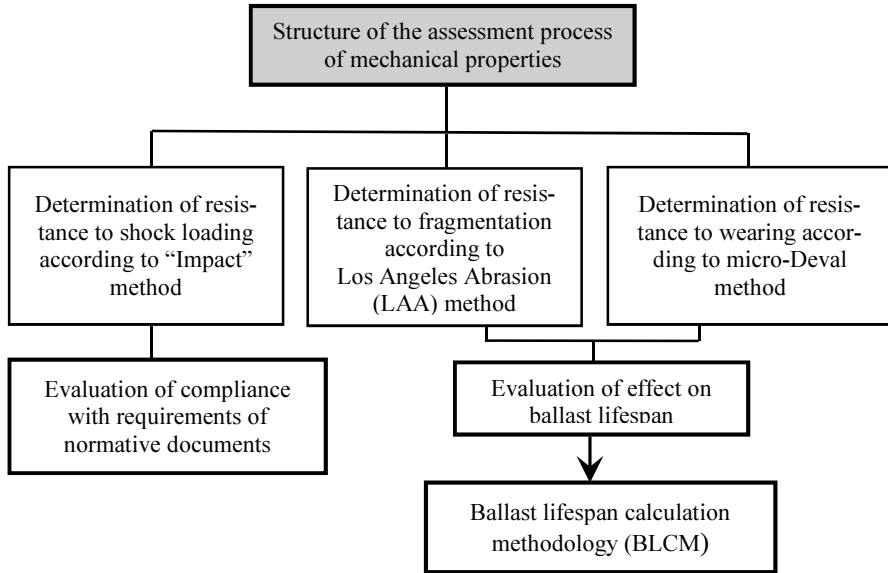


Fig. S4. The assessment process of mechanical properties

The following is a description of the Ballast Lifespan Calculation Methodology (further – BLCM). Hardness and toughness indicators of material have direct impact on the lifespan of ballast prism. Degradation during ballast operational time is non-linear.

The performance of different aggregates can be represented in a composite abrasion indicator, the Abrasion Number (N_A). It is expressed as the sum of the Los Angeles indicator value and 5 micro-Deval indicator values:

$$N_A = LA + 5 \times M_{DE}. \quad (S1)$$

Here, N_A is the Abrasion number, %; LA – the Los Angeles abrasion, %; M_{DE} – the micro-Deval abrasion, %.

It is recommended to use such input parameters correction coefficients when the maximum permissible axle load is 25 t in Europe and concrete sleepers are used applying CPR model to determine lifespan:

- Measurement units: $A=1.102$;
- Axle load: $B=1.400$;
- Sleepers: $C^{-1}=0.667$.

When wooden sleepers are used in the construction, the lifespan of ballast (L_M) can be calculated using the following formula:

$$L_M = 1.5428 \times 10^6 e^{8.08 - 0.0382 \times (LA + 5 \times M_{DE})}. \quad (S2)$$

When concrete sleepers are used in the construction, the lifespan of ballast (L_{GB}) can be calculated using the following formula:

$$L_{GB} = 1.029 \times 10^6 e^{8.08 - 0.0382 \times (LA + 5 \times M_{DE})}. \quad (S3)$$

When using the formulas (S1), (S2) and (S3) it is possible to use the Los Angeles and micro-Deval indicators of crushed stone ballast to calculate the ballast lifespan which is expressed in accumulated train traffic loads MGT (*Million Gross Tons*) to result in breakdown to the point where the ballast needed renewal.

The following is a description of the program of experimental tests and their results. When aiming to determine and evaluate the properties of different aggregates, standardized experimental tests were performed in the laboratory. During experimentation, 2 crushed dolomite ballasts and 3 crushed granite ballasts were tested. As required by standards which regulate the course of testing, the sample size for determining each property was no less than 3. The crushed dolomite was encoded as: D1 and D2. The crushed granite was encoded as: G1, G2 and G3.

The objective of the experimentation was to determine the physical and mechanical properties of the crushed stone and to evaluate whether the values of these properties conform with values required in norms. The course of experimentation was broken up into two stages:

During the first stage, samples were selected and geometrical properties were determined. The granulometric composition of crushed stone was determined. The amounts of small particles and mineral dust were determined. The flakiness indicator, particle shape indicator and particle length indicator were determined.

During the second stage, other physical and mechanical properties of the crushed stone were determined: resistance to freezing and thawing, density, water absorption, resistance to fragmentation, shock loading and wearing (due to wear by attrition).

Object of experimentation – the analysis and determination of physical and mechanical properties of crushed stone samples D1, D2, G1, G2, G3.

Tests performed during experimentation and the standardized methodology applied to them:

Physical properties:

- granulometric composition; amounts of fine particles and mineral dust (LST EN 933-1:2012);
- flakiness indicator; particle length indicator (LST EN 933-3:2012);
- shape indicator (LSTEN 933-4:2008);
- particle density and water absorption (LST EN 1097-6:2013);
- resistance to freezing and thawing (LST EN 1367-1:2007).

Mechanical properties:

- resistance to wearing (LTSEN 1097-1:2011);
- resistance to fragmentation and shock loading (LST EN 1097-2:2010).

The results of testing every property are shown in table S1.

Toughness and hardness of the same origin rocks crushed stone are very different. The results show that LAA values of dolomite crushed stone mixtures differed 7.6 %, M_{DE} values differed 17.0 %. Granite crushed stone indicator values differed accordingly 59.8 % and 49.0 %.

The test results of crushed stone density and water absorption show no indicative relation between these two properties. Density ρ_{cm} of different rock type crushed stone varied from 2.66 t/m³ to 2.80 t/m³ (differed up to 5.25 %), but the water absorption of

granite crushed stone G1, G2 and G3 was only 0.2% and it was 4 times lower than dolomite crushed stone D1 and 6 times lower than dolomite crushed stone D2.

Table S1. Summarised results of testing physical and mechanical properties

Properties	Code of crushed stone	D1	D2	G1	G2	G3
Granulometric category G_{CRB}	C, D	-	D	A, B, C	-	-
Fine particles G_F , %	0.1	0.3	0	1.0	0.1	0.1
Mineral dust f , %	0.5	1.0	0.4	0.3	0.3	0.3
Flakiness indicator FI , %	3	3	10	12	10	10
Particle length indicator L , %	3	0	5	4	8	8
Shape indicator SI , %	9	1	17	9	12	12
Density ρ_{cm} , t/m^3	2.73	2.66	2.68	2.75	2.80	2.80
Water absorption W_{cm} , %	0.8	1.4	0.2	0.2	0.2	0.2
Resistance to fragmentation LA , %	21.1	22.7	14.7	9.2	14.6	14.6
Resistance to shock loading (Impact factor) SZ , %	22.7	24.7	18.8	11.6	16.8	16.8
Resistance to wearing M_{DE} , %	10.6	12.4	5.1	4.9	7.3	7.3
Resistance to freezing and thawing F , %	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1

The resistance to freezing and thawing indicator F varied from 0.1% to 0.5% and it was only 0.2% for dolomite crushed stone D2, though it had the lowest density ($2.66 t/m^3$) and highest water absorption (1.4%). This means that the resistance to freezing and thawing of the crushed stone particles depends not only on its density and water absorption, but on the chemical bond strength either.

The determined values of resistance to fragmentation, resistance to shock load and resistance to wearing showed that the dolomite crushed stone is considerably less resistant to mechanical impact than granite crushed stone. Resistance to shock load SZ of different rock type crushed stone varied from 11.6% to 24.7%, resistance to fragmentation LA – from 9.2% to 22.7%, resistance to wearing M_{DE} – from 4.9% to 12.4%. Best testing results were for granite crushed stone G2, worst – for dolomite crushed stone D2.

3. Evaluation of ballast's physical and mechanical properties and lifespan calculations

The results obtained during crushed stone properties testing (table S1) are used for evaluation in accordance with normative document requirements. The properties of crushed stone and particles it is composed of are evaluated by checking whether their values do not exceed permissible ones indicated in Lithuanian and foreign (Russian, Finnish, Spanish, German, Austrian, U.S. and Canadian, Australian) normative documents.

The permissible indicator values, which are recommended for use in crushed stone regulation in Lithuania, are shown in table S2. However, it does not contain the recommended regulatory values of resistance to fragmentation and resistance to wearing of ballast. The resistance to fragmentation (Los Angeles coefficient) and resistance to wearing (micro-Deval coefficient) indicators are evaluated compositely, by applying the ballast lifespan calculation methodology (BLCM) and the LAA / M_{DE} indicator classification based on the methodology.

Table S2. The recommended regulatory values of crushed stone indicators, when characteristics are determined in accordance with LST EN 13450:2013

Properties	Dolomite	Granite
Granulometric category G_C	C	
Fine particles G_F , %	≤ 1.0	
Mineral dust f , %	≤ 1.0	
Flakiness indicator Fl , %	≤ 20	
Particle length indicator L , %	5–30	
Shape indicator SI , %	≤ 6.0	
Density ρ_{cm} , t/m^3	≥ 2.65	≥ 2.60
Water absorption W_{cm} , %	$\leq 1,5$	$\leq 0,5$
Resistance to shock loading (Impact factor) SZ , %	≤ 25	≤ 22
Resistance to freezing and thawing F , %	≤ 1.0	

Ballast lifespan calculations are performed using the Los Angeles and micro-Deval indicators, determined during laboratory testing on samples. The results of the calculations are a combined evaluation of the mechanical property indicators of a certain crushed stone (aggregate). For the laboratory tested materials, the combined wearing indicator N_A and ballast lifespan L_M or $L_{G/B}$ are evaluated using the formulaes (S1), (S2) and (S3). The results of the calculations are provided in table S3.

BLCM does not take into account the degradation of ballast due to tamping, which is performed during railroad maintenance or repairs. When tamping ballast, it degrades much faster and the realistic lifespan is heavily dependent on the number of ballast tamping cycles. Furthermore, the pollution of ballast due to outside factors or particle penetration may vary. For example, pollution from external sources near stations may be substantially higher and particle penetration may be reduced by using geotextiles for the installation of the ballast prism. Due to the aforementioned reasons, it has been decided to perform the lifespan calculations under the assumption that operating conditions will be ideal.

Table S3. Calculations results of crushed stone ballast lifespan

Code of crushed stone	Lifespan calculation results		
	N_A , %	L_M , MGT	$L_{G/B}$, MGT
D1	74.1	294	196
D2	84.7	196	131
G1	40.2	1073	715
G2	33.7	1375	917
G3	51.1	707	472

Here, D1 and D2 are crushed dolomite samples; G1, G2, G3 are crushed granite samples; N_A – Abrasion number, %; L_M – lifespan of ballast, when sleepers are wooden, %; $L_{G/B}$ – lifespan of ballast, when sleepers are concrete, %; MGT – Million Gross Tonnes (transported on the railway).

When performing calculations based on BLCM, two ballast lifespan projection graphic models were created: figure S5 for when the sleepers are wooden and figure S6 for when the sleepers are concrete.

These graphic models are then used as a basis to classify the Los Angeles and micro-Deval indicators. The indicators are classified into 5 categories, as shown in table S4. In table S4, the railway line category „other railroads“ includes arrival railroads, local and connective railway lines.

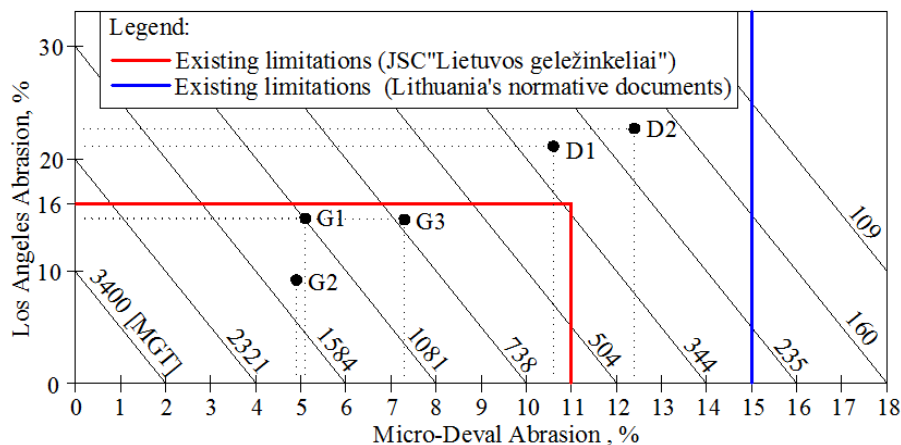


Fig. S5. Lifespan prognostic graphic model of ballast aggregate as sleepers are made of wood (points D1, D2, G1, G2, G3 – laboratory detected characteristics values)

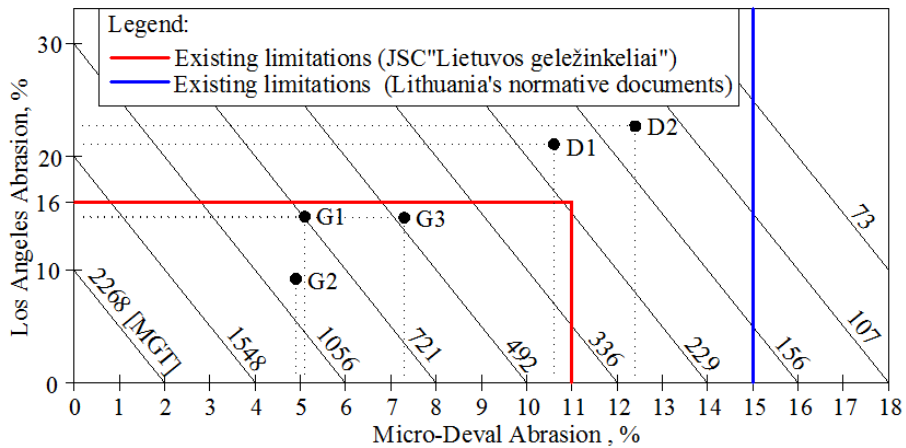


Fig. S6. Lifespan prognostic graphic model of ballast aggregate as sleepers are made of concrete (points *D1*, *D2*, *G1*, *G2*, *G3* – laboratory detected characteristics values)

Table S4. Division of ballast aggregate mechanical properties categories

Category of crushed stone ballast mechanical properties	Railway line category	Intensity of annual traffic loads, MGT
K-1	GLK – High-Speed	-
	GLK – Intensive traffic	≥ 50
K-2	GLK-I	30–50
K-3	GLK-II	9–30
	GLK-III	
K-4	GLK-II GLK-III GLK-IV	≤ 9
	GLK-V Other railroads	2–9
K-5	GLK-V Other railroads	≤ 2

The suggested regulatory limits for every category are formed taking the resistance to wearing and resistance to fragmentation of particles into account. Also taken into account are the permissible values of these parameters in Lithuania and abroad. The graphic models of the proposed Los Angeles and micro-Deval indicator classification when sleepers are either wooden or concrete are provided respectively in figures S7 and S8.

Table S4 indicates in which railway lines the crushed stone can be used according to categories of crushed stone ballast mechanical properties. These categories have to be identified using the the graphic models of the proposed Los Angeles and micro-Deval indicator classification (figures S7 and S8). Table S4 also indicates the relation of mechanical properties categories and allowable maximum train traffic loads intensities on the railway lines. However, when making the decision the period of prospective ballast crushed stone operation time must be assessed.

The recommended regulation limits meet the micro-Deval indicator value, which is currently specified in Lithuanian standardized documents ($M_{DE} \leq 15\%$).

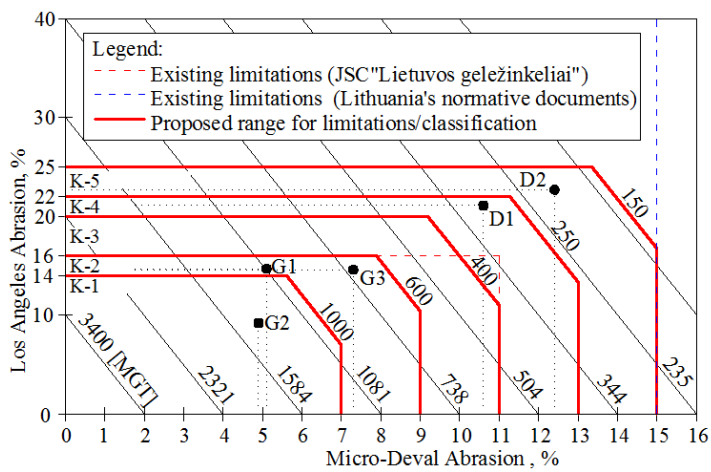


Fig. S7. Classification of micro-Deval and Los Angeles indicators as sleepers are made of wood (points D1, D2, G1, G2, G3 – laboratory detected characteristics values)

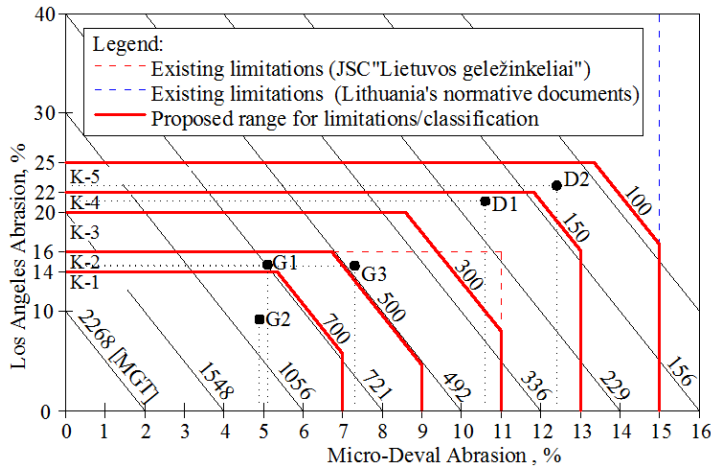


Fig. S8. Classification of micro-Deval and Los Angeles indicators as sleepers are made of concrete (points D1, D2, G1, G2, G3 – laboratory detected characteristics values)

The proposed Los Angeles and micro-Deval indicators graphical classification (figures S7 and S8) is a tool for identifying the categories of mechanical properties (table S4) of the ballast crushed stone in question. The graphical model is not a tool for accurate assessment of prospective lifespan of the ballast crushed stone, but the approximate results can be obtained with interpolation. The prospective lifespan of the ballast crushed stone has to be calculated for every material according to Ballast Lifespan Calculation Methodology (BLCM).

The recommended Los Angeles and micro-Deval indicator classification (based on calculations according to BLCM) distributes materials according only to their mechanical properties. This way, not only are the conditions of granite evaluated, but also of dolomite and other aggregates for use in railway lines, when median annual train traffic load intensity is no larger than 6 Million Gross Tonnes.

General conclusions

1. After performing the analysis of scientific studies and standardized documents it has been determined that:

- The possibility to use crushed stone, which has a micro-Deval indicator (M_{DE}) value lower than 15%, for ballast is not foreseen in Lithuanian standardized documents.
- The largest factor, which increases ballast pollution, is the fragmentation of ballast particles. It makes up about 76% of ballast pollution. The remaining share of the pollution is made up of: penetration of the sub-ballast layer (13%), external contamination (7%), penetration of subgrade soils (3%), sleepers fragmentation (1%).
- Very significant ballast particle degradation occurs during railroad repairs. During one ballast tamping cycle, a particle amount of 0.12–0.24% of the entire mass of the ballast forms under every sleeper.
- The indicators of the ballast's hardness and toughness have direct impact on the lifespan of the ballast prism. Degradation during time of operation is non-linear.

2. The crushed stone ballast selection methodology (BCSSM) is formed. It evaluates the physical and mechanical properties of materials, as well as prospective train traffic loads. Ballast crushed stone's resistance to fragmentation and resistance to wear are evaluated compositely by Abrasion number N_A , which is used for ballast lifespan calculations according Ballast lifespan calculation methodology (BLCM). Graphic models were created and are recommended for use in classification of Los Angeles and micro-Deval indicators. The classification allows to divide mechanical properties into 5 classes and to determine on which railway lines certain crushed stone is appropriate for use in ballast installation.

3. Up to now the limiting values of only two properties are specified in normative documents for evaluating the quality of crushed stone for ballast: granulometric category and resistance to wearing by attrition. It's not enough to determine one physical and one mechanical properties, because these alone do not reveal material's suitability for ballast, therefore after evaluating laboratory test results and requirements for ballast in foreign countries, permissible physical (granulometric composition, amounts of fine particles and mineral dust, flakiness, shape and particle length indicators, density, water absorp-

tion and thermal properties) and mechanical (resistance to wearing, fragmentation and shock loading) properties indicators values were offered. These values are recommended for use in normative documents for railway ballast.

4. In Lithuania there are about 580 km of railways (excluding arrival railway roads) on which the annual traffic load intensity is lower than 6 MGT/y. The calculations of ballast crushed stone lifespan showed that on these roads the crushed dolomite D1 can be used.

5. Crushed granite of fraction 31.5/63 mm is most appropriate for installing ballast on railway lines where the traffic load intensity is greater than 6 Million Gross Tonnes per year. However, the lifespan calculation results provided in the thesis show that depending on mechanical properties, the lifespan on granite ballast can differ two times – crushed granite ballast G2 can sustain 94% more traffic load than crushed granite ballast G3. Moreover, toughness and hardness of the same origin rocks crushed stone differ up to 59.8 %. Therefore, it is inexpedient to value the rock type of crushed stone for ballast, but it is necessary to determine the values of mechanical properties: resistance to fragmentation (Los Angeles method and resistance to wearing (micro-Deval method). The indicators of these properties directly influence the Abrasion number N_A .

6. In the regions of Vilnius, Kaunas and Klaipėda, the prices of crushed granite and crushed dolomite differ by 41–59%. However, in the region of Šiauliai, crushed granite is 123% more expensive than crushed dolomite. When using the latter, it is possible to save around 34000 EUR for every 1 km of a new railway being built. In the region of Šiauliai, the use of crushed dolomite in low traffic load intensity railroads can save around 8.7% of the superstructure installation cost. In the regions of Vilnius, Kaunas and Klaipėda it is possible to save, respectively, 5.3%, 4.8% and 6.7% of the superstructure installation cost.

Priedai³

- A priedas.** Lietuvos geležinkeliuose naudojamos skaldos kasybos karjerai
- B priedas.** Eksperimentinių bandymų metodika ir įranga
- C priedas.** Skaldos granuliometrinės analizės bendrieji ir grafiniai rezultatai
- D priedas.** Lietuvos geležinkelių linijų pagrindiniai keliai ir eismo apkrovos juose
- E priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
- F priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Vaidas RAMŪNAS

MINERALINĖS SKALDOS PANAUDOJIMO
GELEŽINKELIO BALASTUI
GALIMYBIŲ VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

FEASIBILITY EVALUATION OF USING
THE CRUSHED MINERAL STONE
FOR THE RAILWAY BALLAST

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2016 11 08. 10,75 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BJ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius